



**Optimización acústica de silenciadores reactivos de motores estacionarios
monocilíndricos, mediante ingeniería asistida computacional.**

Pastrano Andrango, José Esteban

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Ing. Manjarres Arias, Félix Javier M. Sc.

2022

Latacunga, 11 de agosto de 2022

COPYLEAKS

PASTRANO_JOSE_TESIS.docx

Scanned on: 0:39 August 15, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	624
Words with Minor Changes	372
Paraphrased Words	268
Omitted Words	0

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Manjarres Arias Félix Xavier".

Ing. Msc. Manjarres Arias Félix Xavier

C.C. 0501987416

Director



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Optimización acústica de silenciadores reactivos de motores estacionarios monocilíndricos, mediante ingeniería asistida computacional**" fue realizado por el señor **Pastrano Andrango José Esteban**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, agosto 09 de 2022

Firma:

MSc. FÉLIX JAVIER MANJARRÉS ARIAS

C.C: 0501987416



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Pastrano Andrango José Esteban**, con cédula de ciudadanía N° 1726178856, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Optimización acústica de silenciadores reactivos de motores estacionarios monocilíndricos, mediante ingeniería asistida computacional”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, agosto 09 de 2022

Firma

.....
Pastrano Andrango José Esteban

C.C.: 1726178856



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Pastrano Andrango José Esteban**, con cédula de ciudadanía N° 1726178856, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Optimización acústica de silenciadores reactivos de motores estacionarios monocilíndricos, mediante ingeniería asistida computacional!”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, agosto 09 de 2022

Firma

Pastrano Andrango José Esteban

C.C.: 1726178856

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que han formado parte de mi vida y me han apoyado en este trayecto, sin su ayuda esto no sería posible.

Pastrano Andrango, José Esteban

Agradecimiento

Agradezco a mi familia por estar siempre a mi lado y haberme apoyado en todas las circunstancias, en especial a mi madre Eugenia Guadalupe Andrango Sánchez.

Agradezco al ingeniero Félix Manjarres por haber contribuido con el desarrollo de este trabajo.

Pastrano Andrango, José Esteban

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de Verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Indice de contenidos	8
Indice de tablas.....	13
Indice de figuras	15
Indice de ecuaciones.....	17
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I: Planteamiento del Problema de Investigación	20
Antecedentes Investigativos	20
Planteamiento del Problema.....	21
Descripción Resumida del Proyecto.....	23
Justificación e Importancia.....	26
Objetivos	27
<i>Objetivo General</i>	27
<i>Objetivos específicos</i>	27

Metas	28
Hipótesis	28
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	29
<i>Variable Independiente</i>	<i>29</i>
<i>Variable Dependiente</i>	<i>30</i>
Capítulo II: Marco Teórico	31
Tipos de motores de combustión interna	31
Motores estacionarios monocilíndricos	32
Aplicaciones de los motores monocilíndricos	34
El sonido y sus propiedades	34
<i>Velocidad del sonido.....</i>	<i>35</i>
<i>Ondas de presión</i>	<i>36</i>
<i>Potencia sonora.....</i>	<i>37</i>
<i>Intensidad sonora.....</i>	<i>37</i>
<i>Nivel de presión sonora</i>	<i>38</i>
<i>Percepción del sonido</i>	<i>39</i>
Efectos del ruido	40
Sistema de Escape	41
Silenciadores	44
<i>Perdidas por inserción.....</i>	<i>46</i>
<i>Niveles de contrapresión</i>	<i>47</i>

Clasificación de los silenciadores.....	51
Materiales empleados en los silenciadores.....	52
Dinámica de fluidos computacional CFD.....	52
Capítulo III: Diseño y Construcción.....	57
Consideraciones para el diseño de la geometría del silenciador	57
<i>Espacio disponible.....</i>	<i>57</i>
<i>Flujo de los gases de escape</i>	<i>58</i>
<i>Dimensiones de los ductos</i>	<i>62</i>
Especificaciones técnicas y justificación del prototipo.	63
Obtención de la geometría a través de software CAD	64
Geometría del prototipo 1	64
Geometría del prototipo 2	67
Análisis CFD del prototipo 1	68
<i>Preprocesamiento</i>	<i>68</i>
<i>Solución.....</i>	<i>70</i>
Post-procesamiento	71
<i>Análisis de la velocidad en el interior del silenciador 1</i>	<i>71</i>
<i>Análisis de la temperatura en el interior del silenciador 1</i>	<i>72</i>
<i>Análisis de la presión en el interior del silenciador 1.....</i>	<i>73</i>
Análisis CFD del prototipo 2.....	74
<i>Preprocesamiento</i>	<i>74</i>

<i>Solución</i>	74
Post-procesamiento	75
<i>Análisis de la velocidad en el interior del silenciador 2</i>	75
<i>Análisis de la temperatura en el interior del silenciador 2</i>	76
<i>Análisis de la presión en el interior del silenciador 2</i>	77
Construcción del prototipo	78
Materiales empleados en la fabricación	78
Proceso de fabricación del silenciador	80
Capítulo IV: Validación y Análisis de Resultados	81
Medición de niveles de ruido	81
Niveles de ruido del motor de combustión interna	83
Niveles de ruido con el silenciador original	84
Niveles de ruido con el prototipo 1	84
Niveles de ruido con el prototipo 2	85
Reducción de ruido	86
Perdidas de presión	88
<i>Perdidas de presión en el Prototipo 1</i>	88
<i>Perdidas de presión en el prototipo 2</i>	90
Capítulo V: Marco Administrativo	92
Recursos Humanos	92
Recursos Tecnológicos	92

Presupuesto.....	93
<i>Recursos Materiales.....</i>	<i>93</i>
<i>Recursos de apoyo</i>	<i>93</i>
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	95
Conclusiones.....	95
Recomendaciones.....	98
Bibliografía.....	99
Anexos.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Variable Independiente</i>	29
Tabla 2 <i>Variable Dependiente</i>	30
Tabla 3 <i>Características del MCI</i>	33
Tabla 4 <i>Rapidez del sonido en diversos materiales</i>	35
Tabla 5 <i>Percepción del sonido en función de sus propiedades</i>	40
Tabla 6 <i>Límites de contrapresión</i>	48
Tabla 7 <i>Características del sistema de escape dependiendo de la temperatura</i>	52
Tabla 8 <i>Tipo de flujo</i>	56
Tabla 9 <i>Características del termopar</i>	58
Tabla 10 <i>Datos de temperatura de los gases de escape</i>	59
Tabla 11 <i>Instrumentos de medición y aplicaciones</i>	60
Tabla 12 <i>Datos de la velocidad de gases de escape</i>	61
Tabla 13 <i>Propiedades de la lámina de acero</i>	78
Tabla 14 <i>Propiedades del tubo de acero estructural</i>	79
Tabla 15 <i>Parámetros para suelda MIG</i>	79
Tabla 16 <i>Características del sonómetro</i>	82
Tabla 17 <i>Niveles de presión sonora del motor de combustión</i>	83
Tabla 18 <i>Niveles de presión sonora con el silenciador original</i>	84
Tabla 19 <i>Niveles de presión sonora con el Prototipo 1</i>	84
Tabla 20 <i>Niveles de presión sonora con el Prototipo 2</i>	85
Tabla 21 <i>Perdidas por inserción y reducción del ruido</i>	87

Tabla 22 <i>Perdidas de presión en los silenciadores</i>	91
Tabla 23 <i>Recursos humanos</i>	92
Tabla 24 <i>Recursos tecnológicos</i>	92
Tabla 25 <i>Costo de los Recursos materiales y tecnológicos</i>	93
Tabla 26 <i>Recursos de apoyo</i>	93
Tabla 27 <i>Presupuesto total</i>	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama causa efecto</i>	23
Figura 2 <i>Clasificación de los motores de combustión interna</i>	31
Figura 3 <i>Vista lateral del MCI</i>	33
Figura 4 <i>Zonas de presión de una onda sonora</i>	36
Figura 5 <i>Desplazamiento temporal del umbral de audición.</i>	41
Figura 6 <i>Partes del sistema de escape de un vehículo</i>	43
Figura 7 <i>Sistema de escape de un motor estacionario a gasolina</i>	44
Figura 8 <i>Silenciador empleado en motores de baja cilindrada</i>	45
Figura 9 <i>Silenciador del motor KYODO 7HP</i>	46
Figura 10 <i>Presiones en el silenciador</i>	49
Figura 11 <i>Ecuación de Bernoulli</i>	49
Figura 12 <i>Variables que intervienen en el silenciador</i>	50
Figura 13 <i>Tipos de elementos en MVF</i>	54
Figura 14 <i>Métricas para evaluar la calidad de elementos</i>	55
Figura 15 <i>Configuración del silenciador en el conjunto motor</i>	57
Figura 16 <i>Dimensiones externas del silenciador</i>	58
Figura 17 <i>Montaje para la toma de datos</i>	61
Figura 18 <i>Silenciador de ductos y galerías</i>	63
Figura 19 <i>Silenciador Flow Master</i>	64
Figura 20 <i>Prototipo de silenciador con ductos y galerías</i>	65
Figura 21 <i>Geometría del prototipo 2 Silenciador Flow Master</i>	68

Figura 22 <i>Esquema de trabajo en Ansys</i>	69
Figura 23 <i>Malla aplicada al prototipo 1</i>	70
Figura 24 <i>Velocidad del fluido en el interior del silenciador 1</i>	71
Figura 25 <i>Temperatura del fluido en el interior del silenciador 1</i>	72
Figura 26 <i>Presión del fluido en el interior del silenciador 1</i>	73
Figura 27 <i>Malla aplicada al prototipo 2</i>	74
Figura 28 <i>Velocidad de los gases de escape en el prototipo 2</i>	75
Figura 29 <i>Temperatura de los gases de escape en el prototipo 2</i>	76
Figura 30 <i>Presión de los gases de escape en el prototipo 2</i>	77
Figura 31 <i>Proceso de fabricación</i>	80
Figura 32 <i>Esquema para realizar la medición</i>	81
Figura 33 <i>Puntos de medición</i>	82
Figura 34 <i>Puntos para la medición de los niveles de ruido</i>	83
Figura 35 <i>Niveles de Presión sonora</i>	86
Figura 36 <i>Porcentaje de reducción de ruido</i>	88
Figura 37 <i>Presión en el ducto de entrada del prototipo 1</i>	89
Figura 38 <i>Presión en el ducto de salida del prototipo 1</i>	89
Figura 39 <i>Presión en el ducto de entrada del prototipo 2</i>	90
Figura 40 <i>Presión en el ducto de salida del prototipo 2</i>	90

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Intensidad sonora en función de la amplitud de presión</i>	37
Ecuación 2 <i>Intensidad sonora en función de la potencia</i>	38
Ecuación 3 <i>Niveles de presión sonora</i>	39
Ecuación 4 <i>Índice de pérdidas de transmisión</i>	47
Ecuación 5 <i>Contrapresión</i>	48
Ecuación 6 <i>Ecuación de Bernoulli</i>	49
Ecuación 7 <i>Variación de presión en el silenciador</i>	51
Ecuación 8 <i>Número de Reynolds</i>	56
Ecuación 9 <i>Caudal volumétrico</i>	62
Ecuación 10 <i>Área de la sección de entrada del silenciador</i>	66
Ecuación 11 <i>Área del agujero a perforar</i>	67
Ecuación 12 <i>Mínima cantidad de agujeros a perforar</i>	67
Ecuación 13 <i>Perdidas por inserción</i>	86

Resumen

El presente proyecto analiza el comportamiento de dos geometrías de silenciadores reactivos aplicados a motores monocilíndricos estacionarios. El prototipo 1 basa su geometría interna en la configuración de ductos y galerías, es decir es la configuración tradicional; por otra parte, se tiene el prototipo 2 el cual posee una geometría interna basada en la configuración del fabricante de silenciadores Flow Master; por lo tanto, la configuración es poco habitual; posee una sección triangular que refleja las ondas sonoras de tal forma que se cancelen. Para el análisis CFD se emplea el software Ansys con su entorno Fluent; las geometrías se han diseñado previamente en el software Inventor; y se han exportado hacia el software CAE. Gran parte de la simulación depende del mallado, por lo tanto, se emplean métricas que permiten determinar la calidad del mallado. En la sección de preprocesamiento definen las condiciones de frontera, estos son datos iniciales, los cuales se obtienen a partir de mediciones realizadas en el motor de combustión. A continuación, está la etapa de post procesamiento en la cual se obtiene los perfiles de velocidad, presión y temperatura. Una vez que se obtienen los datos de la simulación se analizan los puntos donde existen los valores máximos y mínimos de presión temperatura y velocidad; con la finalidad de conocer el desempeño del fluido al interior del silenciador. A continuación, se procede con la fabricación de los prototipos; una vez terminados se ensamblan en el motor y se realizan las pruebas para determinar los niveles de reducción de ruido. El procedimiento para estimar estos valores se lo realiza mediante la norma ISO 11820. Finalmente se evalúan las características principales de cada silenciador las cuales son la capacidad para reducir el ruido y las pérdidas de presión que se generan.

Palabras clave: silenciador reactivo, ruido de combustión, contrapresión, motor monocilíndrico

Abstract

This project analyzes the behavior of two geometries of reactive silencers applied to stationary single-cylinder engines. Prototype 1 bases its internal geometry on the configuration of ducts and galleries, that is, it is the traditional configuration; on the other hand, there is prototype 2 which has an internal geometry based on the configuration of the Flow Master silencer manufacturer; therefore, the configuration is unusual; It has a triangular section that reflects sound waves in such a way that they cancel. For CFD analysis, Ansys software is used with its Fluent environment; geometries have been previously designed in Inventor software; and have been exported to CAE software. Much of the simulation depends on meshing, therefore, metrics are used to determine the quality of the meshing. In the preprocessing section define the boundary conditions, these are initial data, which are obtained from measurements made in the combustion engine. Next, there is the post-processing stage in which the velocity, pressure and temperature profiles are obtained. Once the simulation data is obtained, the points where the maximum and minimum values of pressure, temperature and velocity exist are analyzed; in order to know the performance of the fluid inside the silencer. Next, we proceed with the manufacture of the prototypes; Once finished, they are assembled on the engine and tests are carried out to determine noise reduction levels. The procedure to estimate these values is carried out using the ISO 11820 standard. Finally, the main characteristics of each silencer are evaluated, which are the ability to reduce noise and pressure losses that are generated.

Keywords: reactive muffler, combustion noise, back pressure, single cylinder engine.

Capítulo I

Planteamiento del Problema de Investigación

Antecedentes Investigativos

Con el objetivo de disminuir la contaminación acústica provocada por los vehículos los estudios se han centrado en la creación de silenciadores capaces de atenuar el ruido producto de la combustión. Como menciona (Mori Gonzalez, 2016) en su estudio sobre silenciadores del tipo Flow Master que posee complejas geometrías que busca reducir los niveles de presión sonora y además consigue una eficiente salida de los gases de escape, sin afectar el rendimiento del motor.

El ruido provocado por la maquinaria de construcción que emplea los motores de combustión interna para su funcionamiento; produce efectos negativos en la salud de las personas como menciona (Cáceres & Chambilla Flores, 2021), “la exposición al ruido en el trabajo ocasiona disminuciones de sensibilidad auditiva, por ejemplo, aproximadamente el 15% de los individuos expuestos a 90 dB por 8 horas diarias en 40 años de trabajo experimentarán pérdida auditiva importante; sin embargo, también puede aumentar el estrés y multiplicar un riesgo de sufrir un accidente laboral.”

Según (Méndez López et al., 2017), “el desempeño de un silenciador está determinado por dos factores: nivel de atenuación sonora, que indica la cantidad de ruido reducido por el silenciador en decibeles (dB) y la caída de presión, definida como la diferencia de presión que necesita el fluido de escape para superar la resistencia hidráulica generada por el silenciador y así facilitar el flujo de los gases de escape hacia el ambiente”.

De esta manera se busca obtener un silenciador que atenúe niveles altos de presión sonora y genere bajos niveles de caída de presión.

De acuerdo con (García Luque, 2014) realiza un estudio enfocado en el “análisis y comparación de dos métodos matemáticos para calcular y evaluar la atenuación acústica en términos de la pérdida por transmisión sonora de silenciadores pasivos, dispositivos diseñados y utilizados para el control de ruido, los métodos escogidos son Elementos Finitos (FEM) y Matriz de Transferencia (MMT)”.

A través de este estudio se deduce que el método de matriz de transferencia es aplicable a geometrías simples, pues este método se limita por las características internas de cada silenciador; por otra parte, el método de los elementos finitos permite analizar modelos más complejos y proporciona resultados más fiables del comportamiento real de cada silenciador.

Planteamiento del Problema

En la actualidad la contaminación es un problema que afecta a toda la población; este fenómeno se presenta en diferentes formas. Los motores de combustión interna agravan este problema, a través de la contaminación atmosférica y contaminación acústica, producto de la combustión de los motores. Existen cierto grupo de motores como lo son los motores de baja cilindrada de cuatro tiempos a gasolina; que se emplean en diversos equipos como: motobombas, generadores, vibradores, molinos, etc. Los cuales poseen sistemas de escape y silenciadores con baja capacidad para disipar el sonido producto de la combustión.

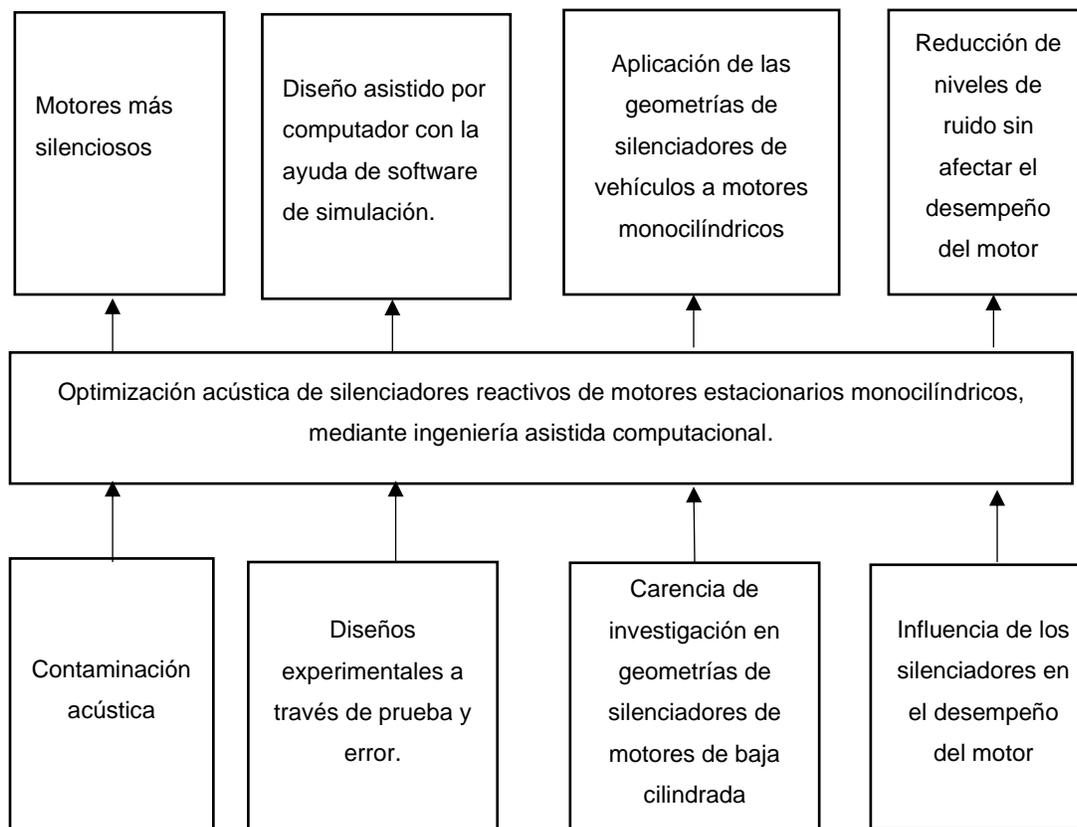
Ante esto los escapes y silenciadores que ocupan este tipo de motores requieren de una optimización, que permitan a estos equipos trabajar con menor ruido, disminuyendo la contaminación acústica.

No obstante, la modificación del sistema de escape del motor; incide en el desempeño del mismo, por lo que es imprescindible un análisis de las variables que describen el comportamiento del fluido como lo son: la velocidad, temperatura y presión del fluido en el interior del silenciador. A través de expresiones matemáticas se emplean estos valores para determinar la incidencia en el funcionamiento del motor.

Debido a que los sistemas de escape y silenciadores se encuentran relacionados con el desempeño del motor; se propone implementar herramientas digitales a través del método de elementos finitos; que permitan analizar las geometrías de los silenciadores; el comportamiento del fluido y que contribuyan a la atenuación del ruido; sin alterar el desempeño del motor.

Existen diversas geometrías de silenciadores que se aplican en el campo automotriz, cuya finalidad es proporcionar a las personas una sensación placentera; eliminando el ruido de la combustión y reduciendo la contaminación acústica. Por lo tanto, hay que considerar esta tecnología aplicada a los vehículos; y adaptarla a los motores mono cilíndricos de baja cilindrada, para reducir los niveles de ruido.

Los sistemas de escape y silenciadores pueden implementar diversos materiales, así como complejas geometrías que elevan el costo de fabricación; sin embargo, el estudio se centra en los silenciadores del tipo reactivo lo que implica que la reducción del ruido se realiza gracias a la geometría interna del silenciador, por lo tanto su fabricación requiere tan solo de procesos convencionales para su fabricación, optimizando recursos y obteniendo buenas características que permitan la mitigación del ruido y el correcto desempeño del motor.

Figura 1*Diagrama causa efecto***Descripción Resumida del Proyecto**

A través del presente proyecto se efectuará un análisis del comportamiento del fluido en el interior del sistema de escape, que permita reducir los niveles de ruido y garantice el óptimo desempeño del motor. Para lo cual se plantea implementar dos geometrías de silenciadores, cuya aplicación se remonta a la industria automotriz como lo son: el silenciador con cámara de resonancia y ducto perforado; así como el silenciador Flow master con cámara de resonancia.

El estudio inicia con la fundamentación teórica, en base a fuentes de investigación confiables; y que contribuyan al desarrollo del proyecto. El siguiente paso es la obtención de las geometrías de los silenciadores; para lo cual se emplea herramientas de modelado 3D, como es el programa Autodesk Inventor que provee de una licencia estudiantil.

En este punto se adapta las configuraciones de los silenciadores ya mencionados; tomando en consideración el espacio disponible, para el sistema de escape en el motor monocilíndrico de cuatro tiempos, a gasolina que será empleado en la investigación.

Estas geometrías serán sujetas a estudio; a través del diseño asistido computacional y la implementación del método de elementos finitos. El software empleado para el análisis CFD es el software ANSYS, el cual permite su uso a través de la licencia estudiantil. Para iniciar con el análisis computacional se realiza el preprocesamiento, para lo cual se define el volumen de control que se obtendrá a partir de la geometría de cada silenciador. Se aplican técnicas de mallado, así como también se evalúa la calidad del mallado mediante las métricas de malla.

Para el análisis mediante elementos finitos; se obtendrán los datos a partir de las mediciones de distintos parámetros del motor como lo son: temperatura de los gases de escape y velocidad de los gases de escape. Para la medición de la temperatura y velocidad de los gases de escape; se empleará un termómetro del tipo sonda termopar, y un anemómetro respectivamente; estos datos se tomarán a la salida del ducto de escape retirando el silenciador; debido a que es el punto inicial del volumen de control.

Los datos obtenidos serán sometidos a un análisis estadístico, que permitirá obtener el valor promedio, producto de la medición.

Una vez obtenidos estos datos se procede a definir el tipo flujo que se produce en el interior del silenciador. Esto con la finalidad de seleccionar el modelo de turbulencia adecuado para el programa computacional; además se definen las condiciones de frontera, variables de entrada, salida y restricciones.

En el procesamiento el análisis computacional del fluido, se lo realizara en el entorno ANSYS Fluent; el mismo que efectúa el cálculo mediante procesos iterativos. En este punto se configura el criterio de convergencia, ajustando los valores, acorde a lo sugerido por el software. Los criterios de convergencia permiten que la simulación sea más exacta y confiable.

El post procesamiento de los datos se realizará a partir de los datos y gráficos que el software proporciona; así como también se aplicarán gráficos estadísticos, y medidas de tendencia que permiten analizar el comportamiento del fluido en las distintas partes del silenciador.

Para la validar que el diseño del silenciador, garantice el correcto desempeño del motor, se realizará un análisis de los valores de presión que se producen en el silenciador, esto permitirá conocer si la geometría interviene con el flujo de gases de escape hacia el ambiente. De esta manera se analiza el fenómeno de contrapresión que puede ocurrir en el silenciador; el cual incide en el desempeño del motor.

Después de obtener un diseño que garantice la disminución del ruido, así como el perfecto desempeño del motor; se procede a la selección del material; para su posterior fabricación. Al tratarse del proceso de fabricación de un prototipo, la fabricación se llevará a cabo mediante técnicas convencionales que incluyen: corte del material, doblado, y suelda.

Por otra parte, para garantizar el buen desempeño del silenciador en la mitigación del ruido, se calcula la pérdida de transmisión acústica. Para esto se procede a realizar las mediciones con el uso del sonómetro, con certificación IEC 651. Además, para determinar la pérdida de transmisión acústica se emplearán las expresiones matemáticas plasmadas en la norma NTE INEN 11820.

Todos los datos obtenidos de las pruebas de campo y análisis matemático del silenciador original se contrastan con las geometrías optimizadas; para esto se emplean gráficos estadísticos a partir de los cuales, se generan juicios de valor y conclusiones con alto valor técnico.

Justificación e Importancia.

Hoy en día los motores de combustión interna son las principales fuentes de contaminación; entre las diversas formas de contaminación se encuentra la contaminación acústica producida por el ruido producto de la combustión; sin embargo, las mejoras de los sistemas de escape y silenciadores se enfocan en cierto grupo de motores, específicamente los motores aplicados en los vehículos; dejando en el olvido los motores de baja cilindrada que se emplean en diversas herramientas.

Debido a la precariedad de los sistemas de escape y silenciadores; estos motores generan niveles de ruido elevados, a tal punto que la geometría interna está compuesta por tan solo una cámara de expansión y un ducto de escape.

Ante esto, se plantea un estudio que permita optimizar los silenciadores, de los motores de baja cilindrada; tomando como referencia geometrías de silenciadores aplicados en vehículos. Además, el estudio se enfoca en reducir los niveles de ruido, sin afectar el rendimiento del motor mediante el uso de herramientas de modelado y simulación computacional.

Por lo antes mencionado y por el flujo de trabajo descrito; el proyecto se encuentra dentro las líneas de investigación de la institución como lo son: Energía y termo fluidos, simulación numérica y tecnologías de fabricación. El presente proyecto se encamina a la reducción de la contaminación acústica y se encuentra relacionado con temas de combustión, fabricación de autopartes, y la integración de los fundamentos teóricos científicos a fin de solucionar un problema; con lo cual el proyecto se encuentra dentro del perfil de egreso del INGENIERO AUTOMOTRIZ.

Objetivos

Objetivo General

- Optimizar la geometría de silenciadores reactivos en motores monocilíndricos, mediante ingeniería asistida computacional; con la finalidad de reducir los niveles de ruido, garantizando el óptimo desempeño del motor.

Objetivos específicos

- Detallar las geometrías de silenciador que serán analizadas a través del método de elementos finitos.
- Obtener los valores de temperatura y velocidad de los gases de escape del motor; a través de técnicas de medición y análisis estadístico que permitan obtener valores confiables.
- Detallar las técnicas empleadas en la fase de preprocesamiento de la simulación mediante elementos finitos.
- Analizar el comportamiento del fluido en el interior del silenciador a través de la ingeniería asistida computacional.
- Construir los prototipos de silenciador capaces de reducir los niveles de presión acústica, producto de la combustión en los motores monocilíndricos.
- Describir los procesos, empleados en la fabricación de los prototipos de silenciador.
- Realizar un análisis comparativo a través de gráficos que permitan contrastar los valores de temperatura, velocidad y presión a lo largo de la geometría del silenciador.
- Comparar los parámetros de atenuación del sonido, del silenciador original y de las geometrías optimizadas mediante gráficos estadísticos.
- Determinar los niveles de contrapresión generados en el silenciador y su efecto en el desempeño del motor.

Metas

- Obtener un prototipo de silenciador capaz de reducir los niveles de presión sonora y que garantice el correcto desempeño del motor.
- Obtención de los valores de presión, temperatura, y velocidad del flujo en el interior del silenciador.
- Análisis del fenómeno de contrapresión y su incidencia en el desempeño del motor.

Hipótesis

A través del diseño asistido por computador y análisis CFD se obtendrá un modelo de silenciador, que aplicado al motor monocilíndrico estacionario de cuatro tiempos de 7HP, reducirá los niveles de presión sonora producto de la combustión, en un 15%.

Variables de la Investigación

Variable Independiente

MOTOR MONOCILINDRICO

Tabla 1

Variable Independiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Dispositivo mecánico compuesto por un cilindro; que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido.	Valores de operación del motor de combustión	Temperatura de gases de escape	°C	Medición	Termómetro
		Velocidad de los gases de escape	m/s	Medición	Anemómetro
	Niveles de ruido del motor	Nivel de presión sonora	dBA	Medición	Sonómetro

Variable Dependiente

Silenciador

Tabla 2*Variable Dependiente*

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Elemento que se encarga de atenuar el ruido producido por una sonora.	Desempeño del silenciador	Perdida por inserción	dB	Cálculo Medición	Software
		Niveles de presión sonora	dB	Simulación Medición	Software Sonómetro
		Contrapresión	kPa	Cálculos	Software
	Análisis del fluido en el interior del silenciador	Velocidad	m/s	Simulación	Software
		Presión	kPa	Simulación	Software
		Temperatura	°C	Simulación	Software
	Análisis de los costos de fabricación	Análisis financiero	USD	Calculo	Software

Capítulo II

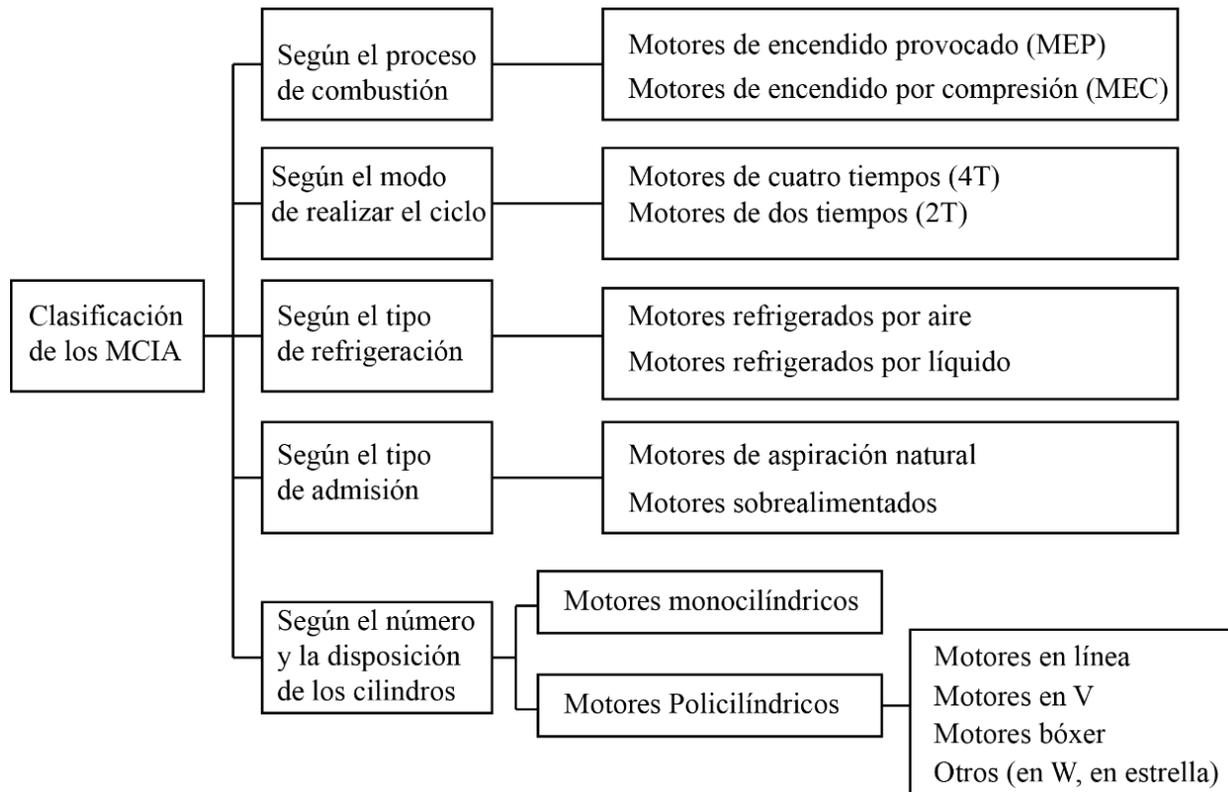
Marco Teórico

Tipos de motores de combustión interna

Los motores de combustión interna alternativos se clasifican de acuerdo a diversos parámetros, tomando como referencia a los autores (Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015), en la Figura 2 se presenta un resumen de la clasificación de los motores de combustión interna alternativos.

Figura 2

Clasificación de los motores de combustión interna



Nota. El gráfico da a conocer la clasificación de los motores de combustión interna alternativos, dependiendo de las características y propiedades de los motores. Tomado de Motores de combustión interna (p.24) por (Rovira de Antonio & Muñoz Domínguez, 2015) UNED

Motores estacionarios monocilíndricos

De acuerdo con la clasificación de los motores de combustión interna alternativas; previamente mencionada, existen varias configuraciones. Sin embargo, el presente trabajo tiene por objeto de estudio los motores monocilíndricos, que emplea como combustible gasolina, es decir forma parte del grupo de motores de encendido provocado; y además opera mediante el ciclo de trabajo de cuatro tiempos.

La característica principal de este tipo de motores es el diseño compacto y versátil; no obstante, pese a su reducido tamaño, cumple con las características de un motor según la descripción del autor (Salinas Villar, 2007). “El motor térmico es una máquina compuesta por diversos elementos mecánicos, unos fijos y otros móviles, que está diseñada para transformar la energía química que posee un determinado fluido, en energía mecánica o movimiento”.

El término estacionario hace referencia a que el motor no tiene por objetivo desplazarse; por el contrario, la energía o trabajo que produce este tipo de motores generalmente se emplea para dar movimiento a algún tipo de mecanismo o máquina fija.

El motor de combustión interna empleado para el presente estudio se puede apreciar en la Figura 3 y posee las siguientes características plasmadas en la Tabla 3.

Figura 3

Vista lateral del MCI



Nota. El gráfico indica una vista lateral del tipo de motor empleado en el presente estudio

Tabla 3

Características del MCI

Marca	KYODO
Numero de cilindros	Monocilíndrico
Ciclo de trabajo	4T
Potencia	7 HP
rpm	3500
Combustible	Gasolina
Tipo de arranque	Manual
Disposición de las válvulas	OHV

Aplicaciones de los motores monocilíndricos

Los motores monocilíndricos estacionarios tienen diversas aplicaciones gracias a su diseño compacto, que lo convierte en elemento fácil de manipular y se adapta a una variedad de máquinas; de acuerdo con (COMFORZA, 2021) menciona las siguientes aplicaciones:

- Fumigadoras
- Motobombas
- Generadores
- Hidrolavadoras
- Apisonadores
- Placas compactadoras
- Cortadoras de concreto
- Despulpadoras
- Picadoras
- Molinos

El sonido y sus propiedades

El sonido es considerado un fenómeno físico que se suscita debido a la propagación de ondas en un medio físico. De acuerdo con (YOUNG & FREEDMAN, 2009, p. 527)

La definición más general del sonido es una onda longitudinal en un medio; el sonido puede viajar por cualquier gas, líquido o sólido. Las ondas sonoras más sencillas son las senoidales, las cuales tienen la frecuencia, la amplitud y la longitud de onda completamente especificadas.

El oído humano es sensible a las ondas en el intervalo de frecuencias de 20 a 20,000 Hz, llamada gama audible, pero también usamos el término sonido, para ondas similares con frecuencias mayores o ultrasónicas y menores o infrasónicas.

Esto indica que el sonido está conformado por un sinnúmero de ondas, las mismas que se encuentran a diferentes frecuencias. Sin embargo, el ser humano está limitado a escuchar sonidos, únicamente a determinadas frecuencias.

Velocidad del sonido

La razón entre la distancia recorrida por una onda sonora en un instante de tiempo es conocida como rapidez del sonido; y esta propiedad varía en función del medio en el cual se transmiten las ondas sonoras. Según (Giancoli, 2008) “ En el aire a 0°C y 1 atm, el sonido viaja con una rapidez de 331 m/s. La rapidez depende del módulo elástico y de la densidad del material” (p.425)

Dependiendo del estado de la materia el sonido se propaga a diferentes velocidades. “En líquidos y sólidos, que son mucho menos compresibles, y por lo tanto, tienen un módulo elástico mucho mayor, la rapidez es aún más grande” (Giancoli, 2008, p. 425)

A continuación, en la Tabla 4 se muestra la rapidez del sonido en diversos materiales:

Tabla 4

Rapidez del sonido en diversos materiales

Material	Rapidez
Aire	343
Aire (0°C)	331
Helio	1005
Hidrógeno	1300
Agua	1440
Agua marina	1560
Hierro y acero	5000
Vidrio	4500
Aluminio	5100
Madera dura	4000
Concreto	3000

Nota. La tabla muestra el valor de la velocidad del sonido (m/s), dependiendo del material en el cual se propaga; siendo los sólidos el medio en el cual las ondas se desplazan a mayor velocidad. Tomado de Física para Ciencias e Ingeniería (Giancoli, 2008) (p.425)

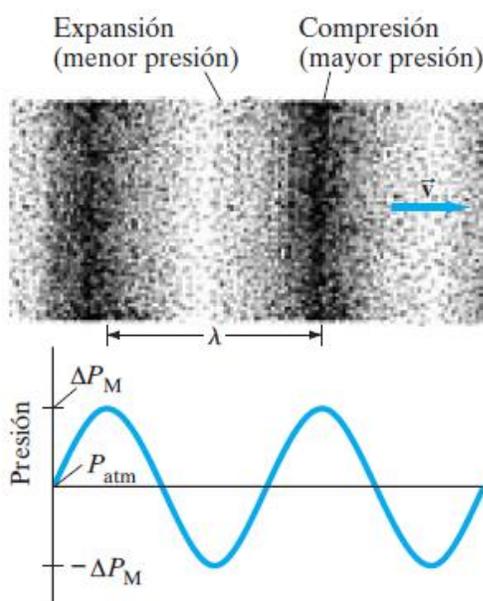
Ondas de presión

El sonido al ser un conjunto de ondas que se desplazan en un medio, provoca que las moléculas que conforman el medio, vibren a determinada frecuencia, esto conlleva a variaciones de presión, también conocidas como amplitud de presión. “Los minúsculos desplazamientos de las partículas generan variaciones de presión. En una onda sonora senoidal en aire, la presión fluctúa por arriba y por debajo de la presión atmosférica con la misma frecuencia que los movimientos de las partículas de aire” (YOUNG & FREEDMAN, 2009, p. 528)

Para detallar como se forman los puntos de presión a medida que pasa una onda sonora se emplea la Figura 4, para esto se emplea una onda de forma sinusoidal.

Figura 4

Zonas de presión de una onda sonora



Nota. El gráfico indica las zonas de mayor y menor presión, tomando como referencia la presión atmosférica, estas zonas dan origen a las variaciones de presión. Tomado de Física para Ciencias e Ingeniería (Giancoli, 2008, p. 426)

De acuerdo con (YOUNG & FREEDMAN, 2009, p. 538) “Una onda sonora muy fuerte en el umbral del dolor tiene una amplitud de presión de cerca de $30 Pa$, mientras que la amplitud de presión de la onda sonora más tenue que puede escucharse es del orden de $3 \times 10^{-5} Pa$.”

Potencia sonora

La potencia sonora o potencia acústica hace referencia a la cantidad de energía que una fuente de ruido puede emitir. Este valor es propio de la fuente y no depende de la distancia a la fuente. Esta propiedad indica la cantidad de energía liberada en una unidad de tiempo, por lo tanto, su unidad es el “W” watt.

Intensidad sonora

Las ondas sonoras al ser producto del movimiento de las partículas del medio en el cual se propagan, poseen energía. De acuerdo con (YOUNG & FREEDMAN, 2009)

Las ondas sonoras, transfieren energía de una región del espacio a otra. Una forma útil de describir la energía transportada por un sonido es con la intensidad de la onda, que es igual a la rapidez media con que la onda transporta energía, por unidad de área, a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación.

Por lo tanto, la intensidad sonora se puede describir en términos de la amplitud de presión, tal como se indica en la **Ecuación 1**.

Ecuación 1

Intensidad sonora en función de la amplitud de presión

$$I = \frac{(P_{max})^2}{2 \rho v} \quad (1)$$

Donde:

I : intensidad sonora

P_{max} : amplitud de presión

ρ : densidad del medio

v : velocidad del sonido

Además de esto la intensidad sonora también se puede describir en función de la potencia sonora, por lo tanto, se emplea la **Ecuación 2**:

Ecuación 2

Intensidad sonora en función de la potencia

$$I = \frac{W}{4 \pi r^2} \quad (2)$$

Donde:

I : intensidad sonora

W : potencia sonora

r : distancia a la fuente

Al igual que en la presión sonora, “el oído humano puede detectar intensidades tan tenues con un valor de $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$; así como también intensidades que se encuentran cerca del umbral del dolor con un valor de 1 W/m^2 ”, según los datos presentados por (Serway & Jewett, 2008, p. 479)

Nivel de presión sonora

Como anteriormente se mencionó el oído es capaz de detectar sonidos en un determinado rango, mejor conocido como gama audible; ya sea que se describa un sonido en función de la amplitud de presión o en función de la intensidad sonora; estas escalas dan lugar a un extenso rango de valores.

“Debido a esta relación entre la sensación subjetiva y la cantidad físicamente medible de la intensidad, es frecuente especificar los niveles de intensidad del sonido mediante una escala logarítmica. La unidad en esta escala es un bel, en honor de su inventor, Alexander Graham Bell, o más comúnmente, el decibel (dB), que es 1/10 bel” (Giancoli, 2008, p. 428). En la **Ecuación 3** se indica la expresión que describe el nivel de sonido de cualquier fuente sonora, en función de la intensidad:

Ecuación 3

Niveles de presión sonora

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3)$$

Donde:

β : es el nivel de presión sonora dado en dB

I : es la intensidad del sonido dado en W/m^2

I_0 : es la intensidad de referencia igual a $10^{-12} W/m^2$

En esta escala, el umbral de dolor de $1 W/m^2$ corresponde a un nivel sonoro de 120 dB, y el umbral de audición que posee una intensidad de sonido igual a $10^{-12} W/m^2$ corresponde un nivel de presión sonora de 0 dB. (Serway & Jewett, 2008, p. 481)

Percepción del sonido

El oído humano puede detectar sonidos gracias a las pequeñas variaciones de presión que se generan producto de la vibración de las moléculas del medio en el cual se transportan las ondas sonoras. Para resumir la percepción del sonido por parte del ser humano se presenta la Tabla 5 en la cual se detallan los límites en los cuales se puede apreciar el sonido dependiendo de la propiedad del sonido.

Tabla 5

Percepción del sonido en función de sus propiedades

Gama audible	Presión sonora (Pa)	Intensidad sonora (W/m²)	Escala logarítmica (dB)
Sonido tenue	3×10^{-5}	10^{-12}	0
Umbral del dolor	30	1	120

Nota. La escala logarítmica permite cuantificar el sonido en un rango de valores más reducido, a diferencia del rango de valores que presenta la intensidad sonora y la presión sonora; esto permite apreciar de mejor manera el intervalo de sonidos perceptibles por el oído del ser humano.

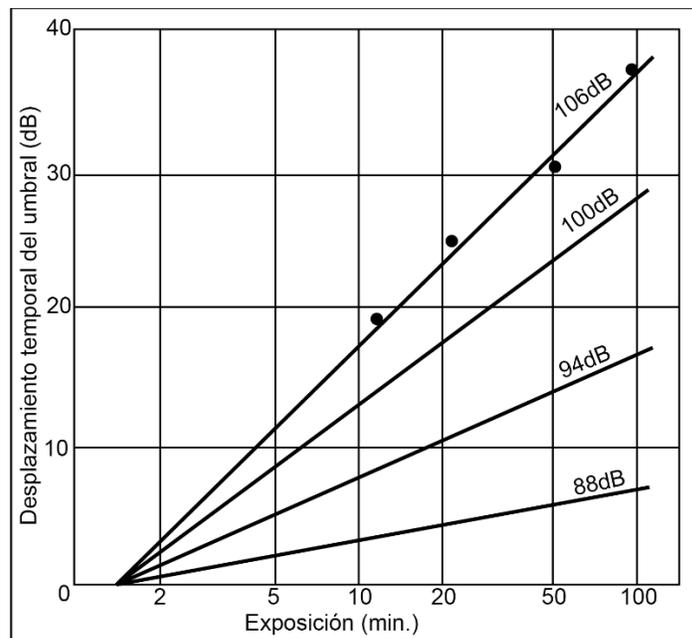
Efectos del ruido

La exposición al ruido puede provocar afecciones a la salud; de acuerdo con la (OMS, 1999, p. 24) una breve exposición a un ruido muy intenso, provoca la rotura del tímpano, mientras que sonidos superiores a los 160dB ocasionan infecciones en el oído interno.

Sin embargo, uno de los fenómenos más comunes, que se suscitan debido a la exposición al ruido, es el desplazamiento temporal del umbral, según la OMS “también se conoce como fatiga auditiva y es considerado una elevación de umbral auditivo.” Esto indica que la exposición al ruido en un determinado tiempo provoca que una persona disminuya su capacidad para escuchar un sonido intensidad. En la Figura 5 se observa una curva que relaciona la exposición al ruido y desplazamiento del umbral de audición.

Figura 5

Desplazamiento temporal del umbral de audición.



Nota. La presente figura muestra la incidencia el ruido en el umbral de audición,

Tomado de EL RUIDO Riesgo para la salud de los trabajadores y molestia para el público (OMS, 1999, p. 28)

De acuerdo con la figura anterior, sí un individuo es expuesto a un ruido de 106dB durante 15 minutos esto ocasionara un desplazamiento de 20dB, es decir si se produce un sonido de 60dB esa persona lo escuchara como un sonido de 40db. Esto implica que la comunicación se ve afectada en el entorno de trabajo, de acuerdo con la (OMS, 1999, p. 32) la conversación normal suele ser de 65dB a un metro de distancia; no obstante al estar expuesto a un ruido, el umbral de audición disminuye, provocando altercados en la comunicación.

Sistema de Escape

El sistema de escape es un conjunto de elementos que cumplen la función de capturar los gases a la salida del motor de combustión, para esto debe generar la menor resistencia posible al paso de los gases, y dirigir este flujo hacia la atmósfera, de tal forma que se reduzca el ruido producto de la combustión del motor.

Para el autor (Llumigusin, 2015); la misión del sistema de escape es “conducir los productos de la combustión hasta un punto donde los gases puedan descargarse sin molestias. Reducir el ruido producido por las intensas pulsaciones de presión que se generan cada vez que un cilindro deja salir su contenido”. Y finalmente imponer al motor una contrapresión mínima, ya que ésta reduce la potencia.

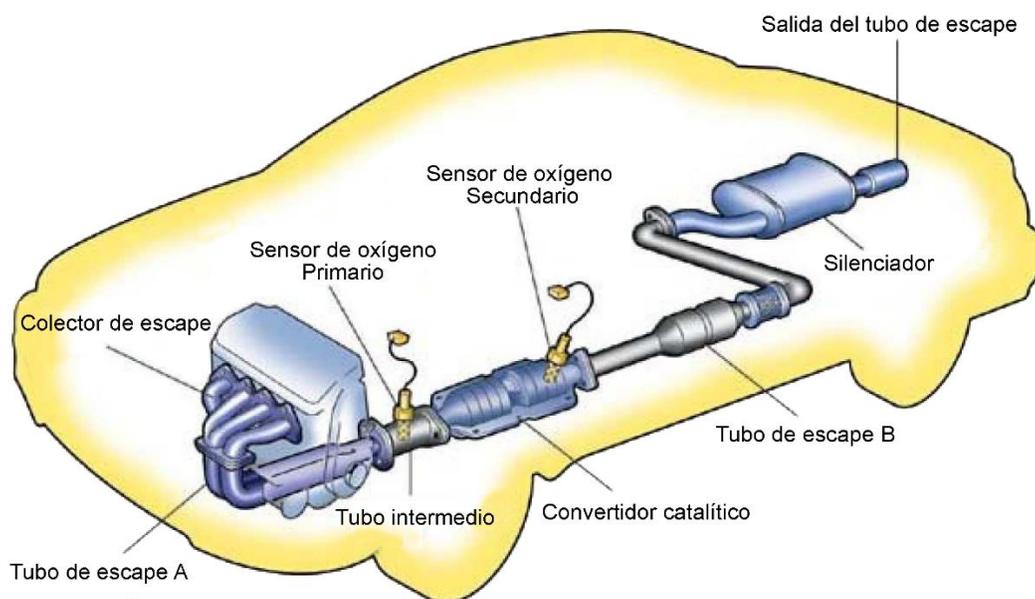
A lo largo de todo el sistema de escape se generan ciertos fenómenos que el conjunto debe soportar. Para los autores (BAZURTO PALMA & LÓPEZ LÓPEZ, 2003)

Se generan fuertes oscilaciones gaseosas como consecuencia de la brusca e intermitente salida de los gases por lo tanto la instalación de escape está sometida a fuertes sollicitaciones térmicas, químicas y mecánicas. Altas temperaturas y cambios de temperatura que se suscitan en la instalación de escape. Además, está la corrosión producida por los gases de la combustión condensados (agua, ácidos sulfurosos), que tiene lugar, principalmente, en la parte posterior más fría. (p.16)

En los vehículos con motor de combustión interna se pueden encontrar diversas partes que conforman el sistema de escape tal como se aprecia en la Figura 6; en la actualidad el sistema de escape está conformado por elementos mecánicos y electrónicos.

Figura 6

Partes del sistema de escape de un vehículo



Nota. En el gráfico se puede apreciar que el sistema de escape de los vehículos cuenta con elementos mecánicos, así como también electrónicos, que permiten monitorear los gases de escape. Tomado de (TOYOCOSTANOTICIA, 2014).

En contraste con el sistema de escape de un vehículo; la configuración para este sistema en los motores estacionarios monocilíndricos se reduce, debido a que son motores más compactos y de menor tamaño. En la Figura 7 se puede apreciar la disposición de los elementos del sistema de escape en este tipo de motores.

Figura 7

Sistema de escape de un motor estacionario a gasolina



Nota. El gráfico indica los elementos del sistema de escape del motor estacionario monocilíndrico de 7HP, empleado en este estudio.

Silenciadores

“Los silenciadores se pueden definir como dispositivos que atenúan el campo sonoro que se propaga a través de ellos. Básicamente el silenciador posee ductos y cámaras que conectan el motor con varias cámaras y terminan en el tubo de salida de gases de escape”.(Möser & Barros, 2009, p. 264)

El silenciador es un elemento del sistema de escape cuya principal función es: “dejar expandir los gases de escape que salen de la cámara de combustión con fuerte impulso (detonación), de modo que no pasen de un nivel sonoro determinado y sin que ofrezcan, una resistencia excesiva a la salida.” (BAZURTO PALMA & LÓPEZ LÓPEZ, 2003, p. 15).

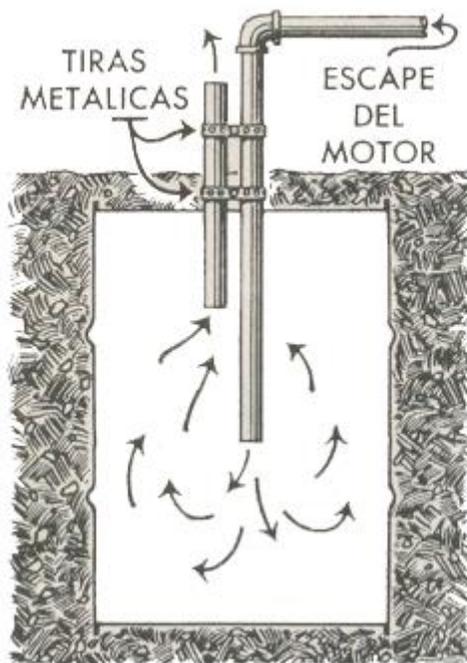
El silenciador en los motores de baja cilindrada; es un componente que posee poco desarrollo, a pesar de que juega un papel fundamental en el control del ruido.

Generalmente este tipo de silenciadores emplea una configuración con dos tubos, uno para el ingreso de los gases de escape hacia la cámara de resonancia del silenciador y el segundo es un tubo de escape que direcciona los gases de escape hacia la atmosfera.

Este tipo de silenciadores, en su cámara de resonancia no posee geometrías que permitan mitigar el ruido. En la Figura 8 se puede observar la configuración básica de los silenciadores empleados en los motores de baja cilindrada.

Figura 8

Silenciador empleado en motores de baja cilindrada

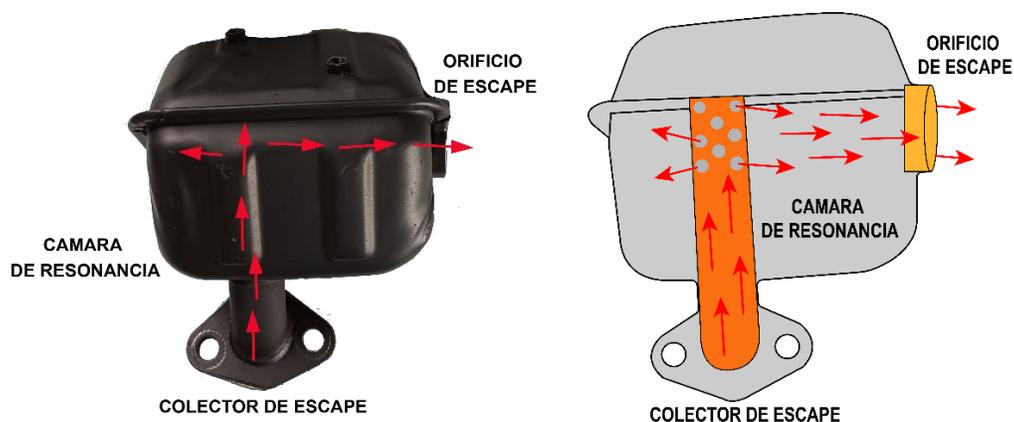


Nota. La figura plasma el flujo de los gases desde el conducto de escape del motor hasta su salida hacia los alrededores. Adaptado de: (Mi Mecanica Popular, 2010).

A continuación, en la Figura 9 se muestra el esquema del silenciador empleado en el motor KYODO de 7HP. En su interior posee una configuración con un tubo perforado que permite redireccionar los gases de escape hacia todas las direcciones en el interior de la cámara de resonancia.

Figura 9

Silenciador del motor KYODO 7HP



Nota. La figura muestra en la parte izquierda la configuración externa del silenciador y en la parte derecha se da a conocer la disposición interna de los elementos. Las flechas indican el flujo de los gases de escape en el interior del silenciador.

Perdidas por inserción

El objetivo principal de un silenciador es reducir los niveles de ruido que se emiten hacia la atmósfera; por lo tanto, para evaluar el desempeño del silenciador, se empleará la pérdida de por inserción como un índice que permitirá conocer la capacidad de atenuación del ruido producido por el motor de combustión.

El concepto del índice de pérdidas por inserción según (Munjál, 2014, p. 54), “se define como la diferencia entre la potencia acústica radiada sin ningún filtro y la potencia que se obtiene con el filtro” (p.54). El término filtro hace referencia al elemento que se encarga de reducir los niveles de ruido, en este caso es el silenciador

De acuerdo con (Munuera & Denia, 2019) “este índice relaciona los niveles de potencia acústica medidos en un mismo punto antes y después de introducir un silenciador entre la fuente y el punto de medida.” (p.65). Por lo tanto, este parámetro se acopla a las características del estudio puesto a que se varía el tipo de silenciador con la finalidad de reducir el nivel de ruido.

La definición del índice inserción se plasma en la Ecuación 4, además se puede emplear la potencia como presión sonora incidente

Ecuación 4

Índice de pérdidas de transmisión

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) = 20 \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right) \quad (4)$$

Donde:

TL: Índice de pérdidas de Transmisión

W_i: Potencia sonora incipiente

W_t: Potencia sonora Transmitida

P_i: Presión sonora incipiente

P_t: Presión sonora Transmitida

Niveles de contrapresión

Los silenciadores en el interior poseen cambios de secciones que modifican el flujo de los gases de escape; antes estos cambios de secciones se generan perturbaciones que generan pérdidas de presión a este efecto se lo conoce como contrapresión. Para (BARRETO, 2014) “La contrapresión se define como la presión que ejerce resistencia al flujo de escape en todo el sistema” (p. 6).

Los motores de combustión en la fase de escape requieren de energía para liberar los gases de escape a la atmosfera sin embargo, si los niveles de contrapresión son elevados; el motor gasta demasiada energía en liberar los gases de escape con lo cual su rendimiento se ve afectado; de acuerdo con (UMESH et al., 2013, p. 46) existen ciertos límites de contrapresión que un motor no debe exceder, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6*Límites de contrapresión*

Tamaño del motor	Límite de contrapresión
Menos de 50kW	40kPa
50-500 kW	20kPa
Mas de 500kW	10kPa

Nota. De acuerdo con la tabla; el motor empleado en el presente estudio posee una potencia de 7HP equivalente a 5.22kW; por lo tanto, los valores de contrapresión no deben exceder de 40kPa.

Para conceptualizar la idea de contrapresión, se aplica la Ecuación 5 en la cual se considera la presión a la entrada del silenciador y la presión a la salida del mismo, tal como se observa en la Figura 10. Debido a los cambios de sección que se emplean en el interior del silenciador se producen pérdidas lo cual se ve reflejado en la disminución de la presión de los gases de escape a la salida del silenciador.

Ecuación 5*Contrapresión*

$$P_c = P_i - P_s \quad (5)$$

Donde:

P_c : pérdidas por contrapresión

P_i : presión a la entrada del silenciador

P_s : presión a la salida del silenciador

Figura 10

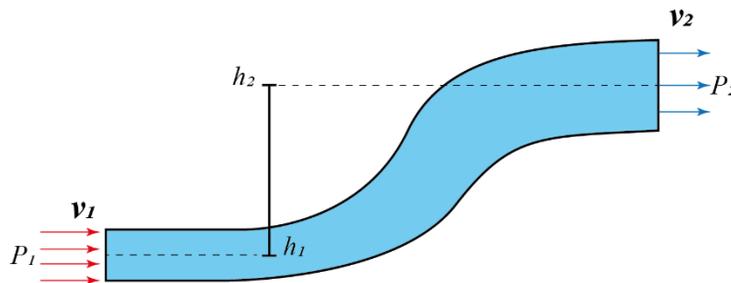
Presiones en el silenciador



Los niveles de contrapresión en el silenciador son considerados diferencias de presión tomados en dos puntos. Por lo tanto, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli, Ecuación 6, para describir de mejor forma este fenómeno. Si se considera dos puntos a analizar cómo se presenta en la Figura 11, intervienen diversas variables.

Figura 11

Ecuación de Bernoulli



Nota. En este gráfico se plasman algunas variables como la presión velocidad y altura entre dos puntos, de un medio continuo.

Ecuación 6

Ecuación de Bernoulli

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho * v_1^2 + \rho * g * h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho * v_2^2 + \rho * g * h_2 \quad (6)$$

Donde:

P_1 y P_2 : presión en los puntos 1 y 2

ρ : densidad del fluido

v_1 y v_2 : velocidad en los puntos 1 y 2

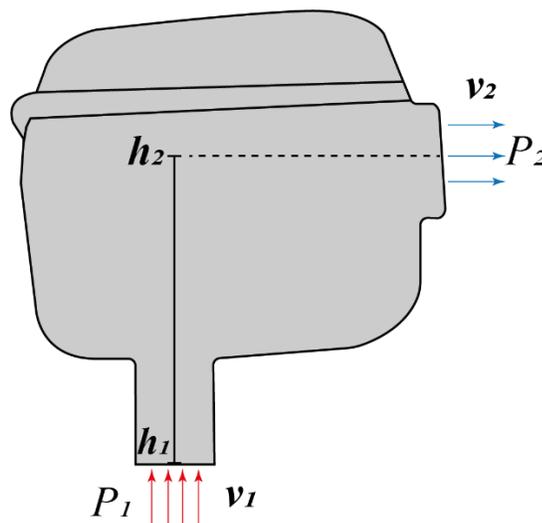
g : gravedad

h_1 y h_2 : alturas 1 y 2 respectivamente

Si se aplican estos criterios y ecuaciones al silenciador del motor monocilíndrico, tal como se aprecia en la Figura 12 se tiene un volumen de control que está determinado por la geometría del silenciador mientras que los puntos a analizar son la entrada del silenciador y el orificio de salida de los gases de escape.

Figura 12

Variables que intervienen en el silenciador



Nota. La configuración de este tipo de silenciadores involucra al colector de escape y al orificio de salida de los gases de escape; los cuales se encuentran separados por una altura.

La ecuación de Bernoulli es considerada una forma más detallada de describir el fenómeno de contrapresión, por tal razón se procede a reformular la ecuación de Bernoulli de tal forma que se obtenga un diferencial de presión como se observa en la Ecuación 7, esta variable permite conocer a más detalle las variables que involucran la contrapresión

Ecuación 7

Variación de presión en el silenciador

$$\Delta P = P_c = \frac{1}{2} \rho * v_1^2 + \rho * g * h_1 - \left(\frac{1}{2} \rho * v_2^2 + \rho * g * h_2 \right) \quad (7)$$

Clasificación de los silenciadores

Los silenciadores se dividen en pasivos y activos, esta clasificación hace relación al tipo de control de ruido que logran.

El control pasivo de ruido está asociado a un aislamiento que depende de una configuración o montaje tal que logra atenuar niveles de presión sonora debido a la composición que se implemente.

Por otra parte, está el control activo de ruido, según (García Luque, 2014) “éste se refiere a un sistema electroacústico que por medio del procesamiento digital de señal con micrófonos y parlantes, con lo cual genera con una segunda fuente de ruido una señal igual a la emitida por la fuente de ruido primaria, pero desfasada y por medio de interferencias superpone ambas señales buscando la cancelación de estas.” (p.33)

Dentro de los silenciadores pasivos existen a su vez dos grandes familias, y son los silenciadores reactivos y disipativos.

“En los ductos reactivos la atenuación se debe a absorción reactiva, es decir, el control de ruido lo realizan debido a su forma es decir cambios de sección y a las reflexiones sonoras a su interior” (García Luque, 2014, p. 33).

Mientras tanto los silenciadores que emplean material de tipo absorbente poroso en su interior son denominados disipativos, el recubrimiento juega un papel importante en la reducción de ruido.

“Cuando utilizan varias configuraciones o formas reactivas acoplada entre sí se tiene un silenciador reactivo combinado y cuando se implementa un recubrimiento absorbente en las

paredes internas de un ducto reactivo se tiene un silenciador de tipo mixto". (García Luque, 2014, p. 34)

Materiales empleados en los silenciadores

De acuerdo con (Aniekan et al., 2017); en el campo automotriz "el sistema de escape está condicionado por las temperaturas de funcionamiento de cada parte, en función de esto se describe las propiedades de los materiales de cada componente del sistema de escape."(p. 52)

En la Tabla 7 se detallan las características y cargas térmicas a las que se encuentra sometido el sistema de escape.

Tabla 7

Características del sistema de escape dependiendo de la temperatura

Criterio	Múltiple de escape	Muffler	Tubo de escape
Temperatura de servicio	750-900°C	100-400°C	100-400°C
Propiedades requeridas	Resistente a altas temperaturas Resistente a la fatiga térmica Resistente a la oxidación	Resistente a la corrosión Resistente a la oxidación	Resistente a la corrosión Resistente a la oxidación

Nota. La tabla muestra las propiedades que requirieren los materiales, dependiendo de la sección del sistema de escape. Tomado de (Aniekan et al., 2017, p. 52)

Dinámica de fluidos computacional CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD del inglés Computational Fluid Dynamics es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la

mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos. (ESSS, 2020).

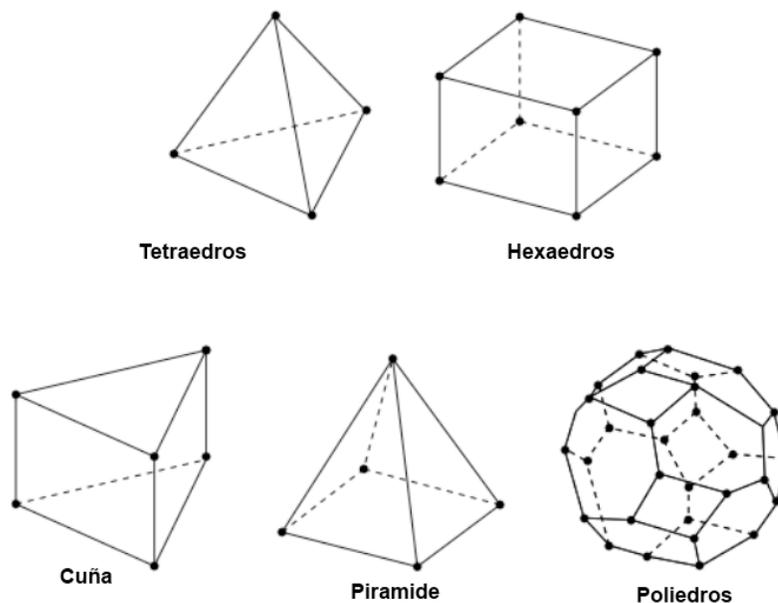
El primer paso para obtener excelentes resultados en el análisis es la preparación de la geometría, según (Amaral, 2016) “en la preparación del modelo para la generación de la malla es importante destacar que cualquier limpieza de la geometría debe atenerse al hecho de que las modificaciones realizadas contemplen facilitar y optimizar la etapa de generación de la malla”. Entre algunos parámetros que se debe considerar a la hora de simplificar una geometría, se tiene:

- Remover pequeñas grietas para evitar un refinamiento innecesario de la malla en regiones de no son de gran interés.
- Remover los redondeos o a su vez transformarlos en biseles para prevenir un refinamiento de curvatura.
- De darse el caso, eliminar las zonas de proximidad para permitir la generación de mayores elementos de malla.
- Eliminar las perforaciones para poder simplificar el modelo

En cuanto al mallado, al emplear el método de volúmenes finitos se utilizan elementos 3D; entre los cuales se tienen diversos tipos de elementos como: tetraedros, hexaedros, cuñas pirámides, poliedros. Tal como se observa en la Figura 13.

Figura 13

Tipos de elementos en MVF



Nota. La gráfica muestra los tipos de elementos empleados en el método de volumen finito.

Tomado de ANSYS Fluent User's Guide (ANSYS Inc., 2015a, p. 114)

La calidad de los elementos empleados en el mallado se puede analizar a través de los siguientes criterios:

Orthogonal Quality: “se calcula para las celdas utilizando el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de sus caras, el vector del área de la cara correspondiente y el vector desde el centroide de la celda hasta los centroides de cada una de las celdas adyacentes”.

(ANSYS Inc., 2015c)

De acuerdo con (ANSYS Inc., 2015b) “Las peores celdas tendrán una calidad ortogonal más cercana a 0, con las mejores celdas más cerca de 1. La calidad ortogonal mínima para todos los tipos de celdas debe ser superior a 0,01, con un promedio”

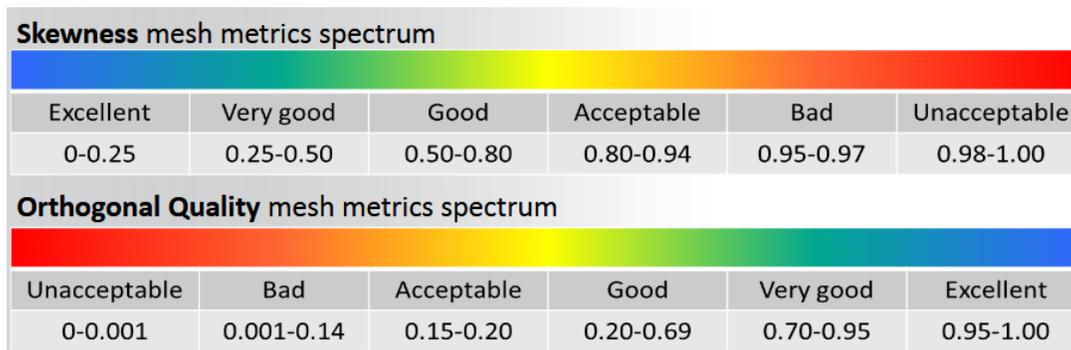
Aspect ratio: es una medida del estiramiento de la celda. En general (ANSYS Inc., 2015b) recomienda evitar cambios repentinos y grandes en las proporciones de las celdas en áreas donde el campo de flujo muestra grandes cambios o fuertes gradientes.

Skewness: “se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas muy sesgadas pueden disminuir la precisión y desestabilizar la solución” (ANSYS Inc., 2015b)

A continuación, en la Figura 14 se contrastan los valores que deben tomar las métricas Skewness y Orthogonal Quality, para que un elemento sea de buena calidad.

Figura 14

Métricas para evaluar la calidad de elementos



Nota. La figura indica el rango de valores para evaluar la calidad de los elementos de una malla, de acuerdo con el criterio Skewness y Orthogonal Quality. Tomado de Mesh Quality & Advanced Topics (ANSYS Inc., 2015d, p. 14)

En la parte de preprocesamiento intervienen variables inherentes a modulo Fluent de ANSYS en el cual se puede determinar las condiciones de frontera, definir el fluido y sus propiedades. En este apartado los parámetros deben ser precisos pues estos influirán directamente en los resultados.

Como parte fundamental de la mecánica de fluidos, es imprescindible caracterizar el movimiento del fluido con el cual se va a trabajar. El indicador que permite conocer el tipo de flujo, es el número de Reynolds que se representa en la Ecuación 8:

Ecuación 8*Número de Reynolds*

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (8)$$

Donde:

Re: número de Reynolds ρ : densidad del fluido ν : viscosidad cinemática μ : viscosidad dinámica*D*: diámetro del ducto

En función del número de Reynolds se puede caracterizar a un flujo como laminar o turbulento, tal como lo indica la Tabla 8:

Tabla 8*Tipo de flujo*

Flujo laminar	En transición	Flujo turbulento
$Re < 2000$	$2000 \leq Re \leq 4000$	$Re > 4000$

Y con respecto al apartado de post procesamiento, se refiere a la interfaz de resultados, en la cual se pueden apreciar las variables de forma gráfica. La información que describe el comportamiento de los fluidos, puede ser exportada de tal forma que estos datos pueden ser organizados y analizados en un software estadístico. A partir de aquí el manejo de los datos y variables a analizar deben ser interpretadas por parte del diseñador; esto permitirá obtener conclusiones acerca del prototipo analizado.

Capítulo III

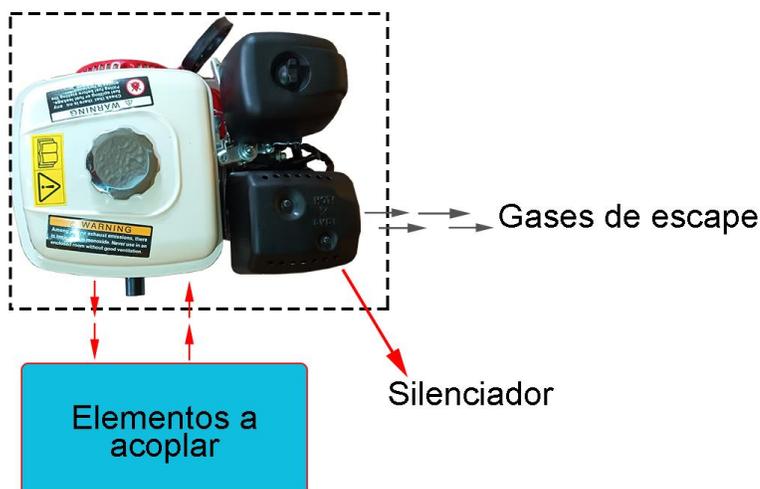
Diseño y Construcción

Consideraciones para el diseño de la geometría del silenciador

En los motores de combustión de baja cilindrada el silenciador permite redireccionar los gases de escape de tal forma que no afecten la integridad del motor y sin que interfieran con el funcionamiento de los elementos a acoplar; además el diseño es compacto con lo cual este tipo de motores se adaptan a cualquier tipo de maquinaria. De esta forma el flujo de gases de escape hacia la atmosfera está condicionado en la siguiente dirección tal como se indica en la configuración de la Figura 15.

Figura 15

Configuración del silenciador en el conjunto motor



Espacio disponible

El espacio que ocupa el silenciador, está diseñado para evitar interferencias con los implementos a los cuales se va acoplar. Tal como se observa en la Figura 16 las dimensiones del silenciador no exceden el límite del conjunto motor. A partir de estas dimensiones se obtienen las distintas geometrías de los prototipos.

Figura 16

Dimensiones externas del silenciador



Flujo de los gases de escape

Los gases de escape son el producto final de la combustión y gran parte de la energía del ciclo termodinámico que se suscita en el motor; se disipa a los alrededores en forma de calor. Una característica muy importante de este tipo de fluidos, es la elevada temperatura que alcanzan los gases de escape; por lo tanto, es un valor imprescindible en el diseño del silenciador.

Para obtener la temperatura de los gases de escape se emplea una sonda termopar del tipo K la cual posee las siguientes características, Tabla 9:

Tabla 9

Características del termopar

Característica	Valor
Temperatura de operación	0 – 500 °C
Termopar tipo	K
Material de prueba	Acero inoxidable 304
Precisión	1°C
Diámetro de la sonda	3mm
Longitud de la sonda	40mm

Debido al movimiento intermitente del pistón, la velocidad de los gases de escape no es un valor constante, por lo tanto, se procede a realizar 5 mediciones las cuales pasan por un proceso estadístico que permitirán determinar la media aritmética la desviación estándar y verificar la homogeneidad de los datos obtenidos como se plasma en la Tabla 10.

Tabla 10

Datos de temperatura de los gases de escape

Medición	Temperatura °C
1	298.1
2	310.2
3	308.5
4	315.9
5	318.5
Media aritmética	310.5
Desviación estándar	7.9
Coeficiente de variación	0.025

De acuerdo con el autor (Galindo, 2011, p. 36) los datos se consideran homogéneos si el coeficiente de variación es: $CV < 1$. La homogeneidad de los datos implica que las mediciones realizadas, no incluyen valores atípicos; además al obtener un coeficiente de variación cercano a cero se verifica la validez de estos datos.

Los valores de la velocidad del fluido son tomados en base a la norma de buenas prácticas en la industria NTP 668, mediante la cual menciona las siguientes características sobre los instrumentos de medición.

Tabla 11*Instrumentos de medición y aplicaciones*

Instrumento	Rango de velocidades optimo	Rango aproximado de temperaturas	Observaciones
Tubo de Pitot	3 m/s (por debajo pierde precisión)	Cualquiera (max. 700 °C)	Para atmósferas pulverulentas, tubos de Pitot en S. Robusto y manejable.
Anemómetros de molinete	5 - 40 m/s	<350 °C	Algunos no están indicados para medidas en conducto por su tamaño.
Termoanemómetros	< 5 m/s (variable)	< 70 °C	Mecanismo delicado. Pueden incorporar sensores y software que permitan corregir por temperatura y humedad y obtener directamente la lectura de velocidad y caudal (introduciendo la sección).

Además, la normativa NTP 668 indica que para ductos con diámetro inferior a 15 cm el número de mediciones debe ser de 6; con lo cual se procede a registrar los valores de la velocidad de los gases de escape; no obstante, para obtener el valor de la velocidad se adaptó un tubo de diámetro constante que reemplaza al silenciador con lo cual se conoce el área del ducto, y a su vez redireccionará el fluido de tal forma que se obtengan valores más precisos de la velocidad. En la Figura 17 se muestra el dispositivo acoplado al motor.

Figura 17

Montaje para la toma de datos



Los valores que se muestrean son tomados con el motor al 100% de su aceleración, para determinar estos parámetros se implementó un anemómetro de molinete como lo indica la normativa del (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene, 2004) NTP 668, la configuración de los dispositivos se indican en la Figura 17

Con el motor al 100% de aceleración es decir a 3950 rpm, se obtuvieron los siguientes datos, que se indican en la Tabla 12

Tabla 12

Datos de la velocidad de gases de escape

Medición	Velocidad (m/s)
1	10.6
2	10.4
3	11.1
4	10.6
5	11.3
6	10.2
Velocidad promedio	10.7

Una vez que se conocen la velocidad de los gases de escape, es momento de caracterizar el tipo de flujo con el cual se va a trabajar. Para lo cual se emplea el número de Reynolds y se utiliza la Ecuación 8. Además para resolver esta ecuación se debe conocer el valor de la densidad, viscosidad dinámica por lo tanto se hace uso de los anexos del libro termodinámica de autor: (Cengel & Boles, 2011, p. 894)

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{10.7 * 0.021}{4.091 * 10^{-5}} = 5492$$

De acuerdo con los cálculos realizados se determina que el flujo de los gases de escape es del tipo turbulento.

Dimensiones de los ductos

El silenciador al estar compuesto por un conjunto de ductos y galerías, que provocan un cambio de dirección en el movimiento del fluido; deben permitir que el paso de los gases de escape, lo más natural posible y así evitar pérdidas de energía. Ante esto el paso del fluido está condicionado por el caudal que se genera producto del movimiento cíclico del motor.

Por lo tanto, se busca que la cantidad de masa por unidad de tiempo, que ingresa al silenciador sea la misma a la salida del tubo de escape.

Para obtener el caudal del motor se aplica la Ecuación 9 en la cual se identifica dos variables: la velocidad y el área.

Ecuación 9

Caudal volumétrico

$$Q = V * A \tag{9}$$

Donde:

Q : es el caudal m^3/s

V : es la velocidad m/s

A : área del ducto m^2

En vista de que el sonido se produce por el movimiento de las moléculas es imprescindible que la velocidad se mantenga constante, por lo tanto, según la Ecuación 9 esto implica que el área de entrada y de salida sean iguales. De esta forma las dimensiones de los ductos de entrada y salida poseen un diámetro interior de 21mm.

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

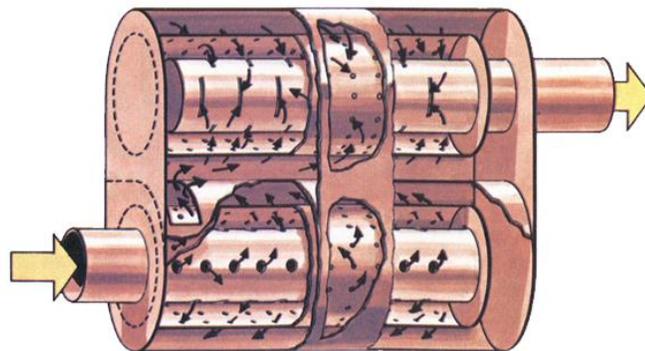
$$A_1 = A_2$$

Especificaciones técnicas y justificación del prototipo.

En el campo automotriz se encuentran varios tipos de silenciadores; en el grupo de silenciadores reactivos los más empleados son: la configuración de ductos y galerías, además también existen ciertos silenciadores que emplean geometrías poco convencionales como lo es el FLOW master. Estas configuraciones que se indican en las Figura 18 y Figura 19; son empleadas en el ámbito automotriz y son consideradas el punto de partida para obtener la geometría de los silenciadores aplicados en motores de baja cilindrada.

Figura 18

Silenciador de ductos y galerías



Nota. La figura muestra la configuración de un silenciador compuesto por ductos y galerías.

Tomado de (MOTORGIGA, 2022)

Figura 19

Silenciador Flow Master



Nota. La figura muestra un silenciador Flow Master series 50, obtenido de la página de comercialización de silenciadores: (Holly Performance, 2022)

Obtención de la geometría a través de software CAD

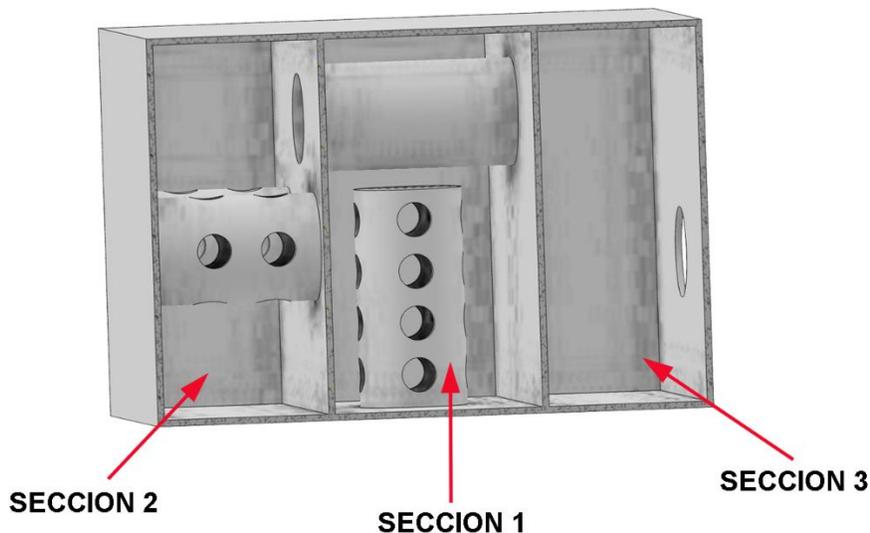
A continuación, se presenta la geometría de los silenciadores aplicados a motores de baja cilindrada, tanto con la configuración de ductos con galerías y la geometría basada en la configuración FLOW MASTER.

Geometría del prototipo 1

El prototipo uno está constituido por una serie de tubos que conectan tres galerías las dimensiones del silenciador se basan en la disponibilidad de espacio. Sin embargo, la geometría interna del prototipo está compuesta por tres secciones claramente definidas en la Figura 20, en la primera sección se encuentra un tubo con perforaciones que distribuyen el fluido en la cámara de expansión, con lo cual se busca difuminar el sonido y a su vez distribuir el fluido en toda la sección.

Figura 20

Prototipo de silenciador con ductos y galerías



A continuación, se tiene dos agujeros que comunican la sección 1 con la sección 2; al igual que en el apartado número 1, se busca dispersar las ondas sonoras en toda la cámara, con lo cual se realizan perforaciones que redireccionan los gases de escape de tal forma que se dispersen en toda la sección 2.

Finalmente, el fluido pasa a la sección tres mediante un tubo con perforaciones en los extremos; permitiendo que los gases de escape se distribuyan en toda la sección y se preparen para ser evacuados hacia el exterior.

Para evitar que el fluido acelere de forma abrupta se considera que el caudal y la velocidad se mantengan constantes a medida que recorren el interior del silenciador por lo tanto las dimensiones de los ductos se establecieron en 21mm tal como se indicó en la sección anterior.

En cuanto a las perforaciones del diseño, se debe considerar que, si se disminuye el área de circulación del fluido, esto provoca que el fluido se mueva con dificultad ocasionando que se generen contrapresiones y pérdidas de energía. Por lo tanto, el número de perforaciones está condicionado de la siguiente forma.

Al considerarse el silenciador un conducto donde el caudal volumétrico se mantiene constante se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$v_1 * A = v_2 * a$$

El sonido se produce por la vibración de las moléculas así que no es adecuado que la velocidad se incremente; por lo tanto, esta se mantiene constante y se busca el área de las perforaciones que se van a realizar.

En primer lugar, se sabe que el flujo volumétrico atraviesa los ductos del silenciador que poseen un diámetro interior de 21mm. Para la sección uno y dos se considera realizar perforaciones de un diámetro 8mm, entonces las condiciones iniciales son:

$$D = 21mm$$

$$d = 8mm$$

$$v = \frac{25m}{s}$$

El área del tubo que ingresa al silenciador es la siguiente:

Ecuación 10

Área de la sección de entrada del silenciador

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{0.021^2}{4} = 3.46 * 10^{-4} m^2 \quad (10)$$

El área del agujero a perforar es:

Ecuación 11 *Área del agujero a perforar*

$$a = \pi * \frac{d^2}{4} = \pi * \frac{0.008^2}{4} = 5.03 * 10^{-5} m^2 \quad (11)$$

Por lo tanto, la cantidad mínima de agujeros a perforar es la siguiente:

Ecuación 12

Mínima cantidad de agujeros a perforar

$$n > \frac{A}{a} \quad (12)$$

$$n > \frac{3.46 * 10^{-4}}{5.03 * 10^{-5}} = 6.8 \text{ agujeros}$$

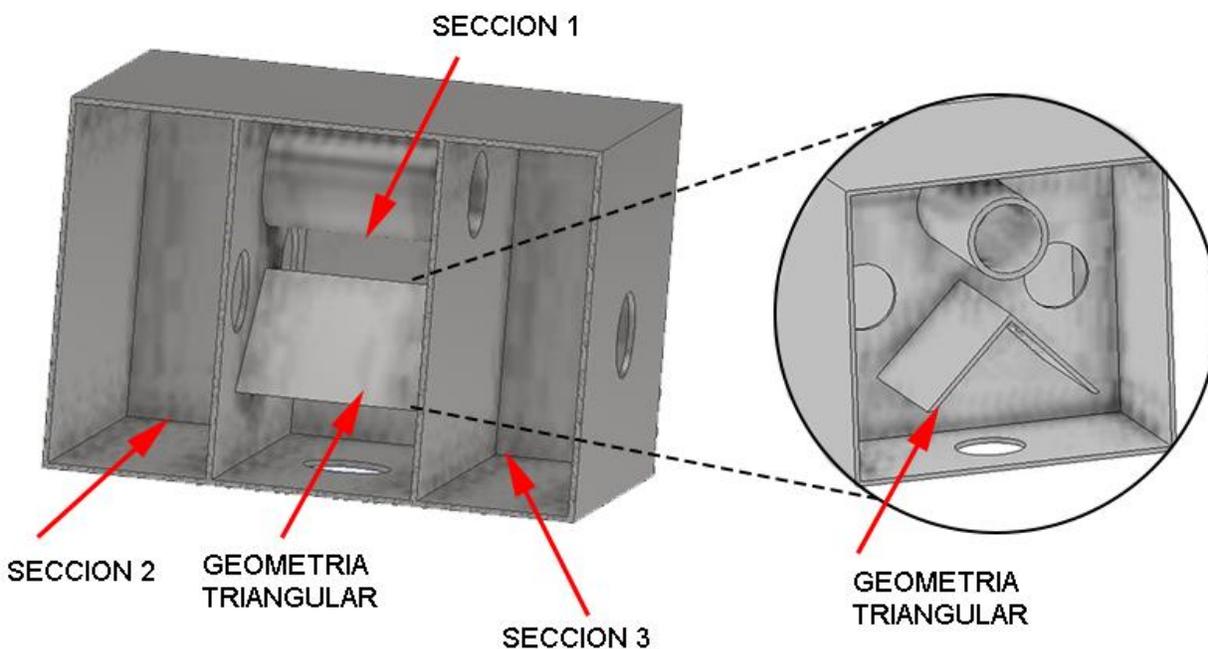
Con la finalidad de evitar que el fluido se acelere de forma abrupta por los cambios de sección se ha distribuido un total de 16 agujeros que permiten direccionar el fluido en todas las galerías.

Geometría del prototipo 2

El prototipo 2 se basa en las configuraciones del fabricante de silenciadores Flow master, el cual es líder en la fabricación de silenciadores de alto rendimiento para la industria automotriz, la geometría interna presenta tres secciones tal como lo indica la Figura 21.

Figura 21

Geometría del prototipo 2 Silenciador Flow Master



En la primera sección se visualiza una pared en forma de cuña, que tiene la función de redireccionar las ondas sonoras de tal forma que se cancelen, además esto permitirá al fluido distribuirse en la sección uno. Después los gases de escape pasan hacia la cámara de expansión en la sección dos, y finalmente continúan hacia la sección tres; el objetivo de las cámaras de expansión es debilitar las ondas sonoras, en el instante en que se encuentran con un medio mucho más amplio. Para evitar cambios de velocidad en el movimiento del fluido se mantiene constante el diámetro de los tubos que conectan las diferentes secciones.

Análisis CFD del prototipo 1

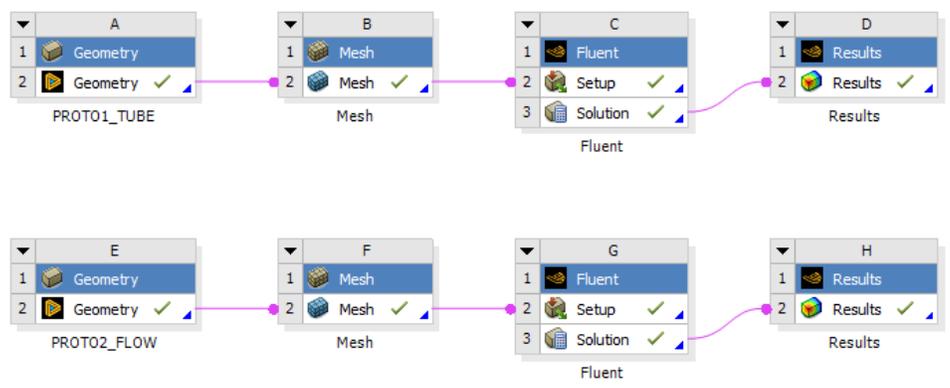
Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento inicia con la exportación de la geometría desde el software CAD hacia el programa de elementos finitos; para esto fin se exporta en formato STEP.

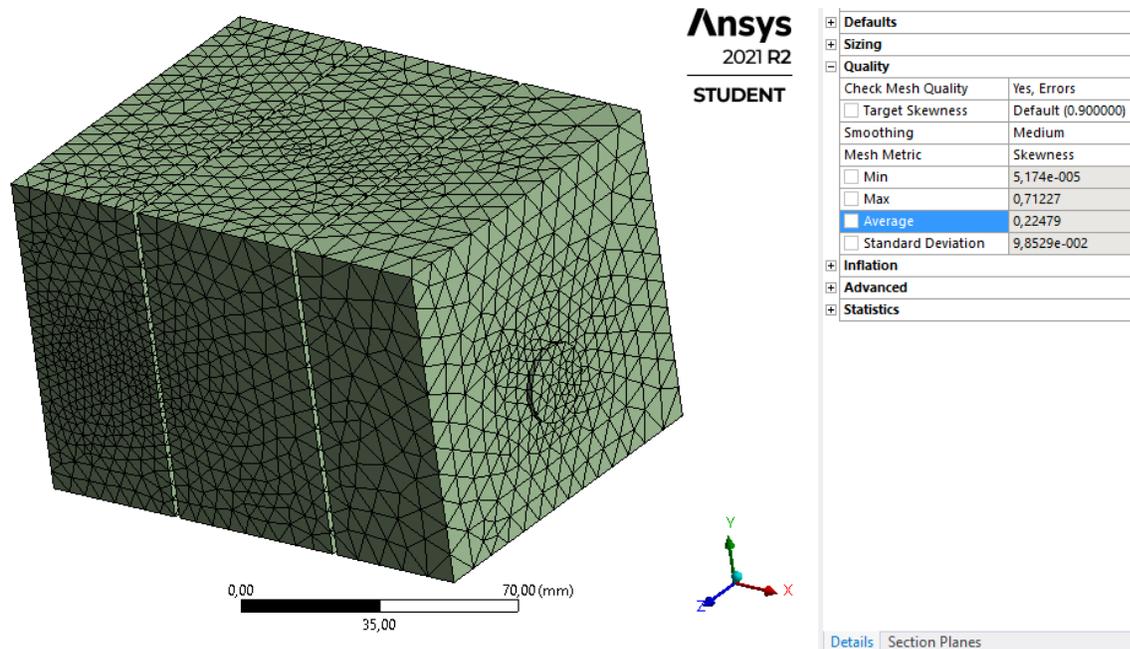
Mientras tanto en el software ANSYS se crea un proyecto, el cual tiene el siguiente work Flow como indica la Figura 22; esta configuración permite trabajar cada etapa de preprocesamiento, mallado, cálculo y resultados por separado.

Figura 22

Esquema de trabajo en Ansys



Para el mallado se emplean técnicas de mallado que incluyen refinamiento de malla, variación de la tasa de crecimiento y evaluación de la calidad de malla a través de la métrica Skewness la cual debe ser menor a 0.25 para ser considerada una malla excelente. La configuración empleada en el modelo se visualiza en la Figura 23.

Figura 23*Malla aplicada al prototipo 1*

Nota. En la figura se muestra el mallado aplicado a la geometría del prototipo 1, el parámetro que indica la calidad de la malla es la métrica Skewness en la cual se obtiene un valor promedio de 0.224 con lo cual la malla se considera excelente.

Solución

Para efecto de la simulación se toma el valor de la velocidad de los gases de escape; cuando el motor alcanza el máximo de revoluciones; debido a que este es un punto crítico donde la velocidad es máxima, los niveles de presión sonora son elevados y en general las condiciones de operación del motor son las más exigentes. Los datos empleados son la velocidad de entrada de 10.7 m/s y la temperatura del fluido de 310°C.

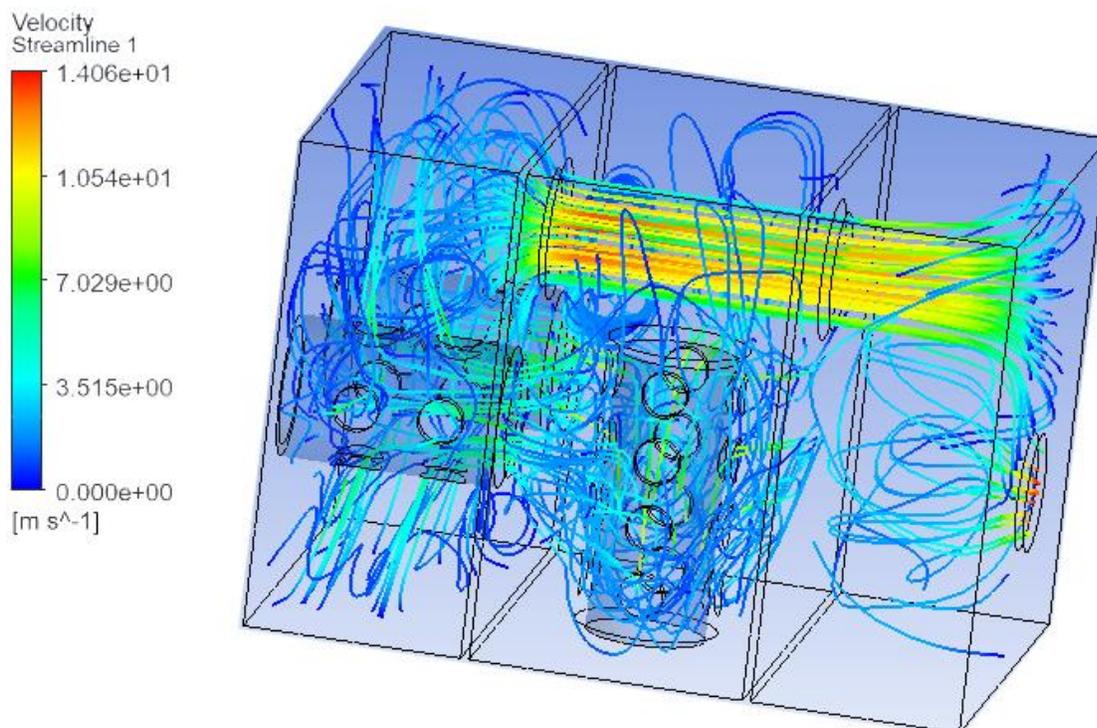
Post-procesamiento

Análisis de la velocidad en el interior del silenciador 1

La velocidad del fluido en el interior del silenciador se visualiza en la Figura 24

Figura 24

Velocidad del fluido en el interior del silenciador 1



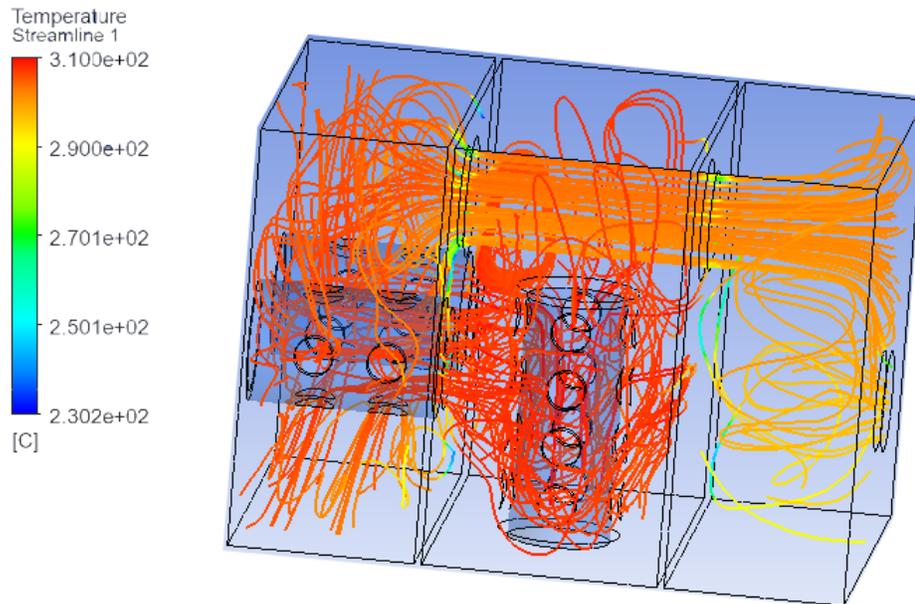
Nota. En la figura se observa la distribución de la velocidad del fluido, donde se puede notar que los valores mínimos se encuentran en las galerías de expansión y en las zonas donde hay cambios de sección, mientras que los valores máximos son localizados en los ductos donde hay poca resistencia al paso del fluido. Siendo 10.7 m/s el valor inicial y 14.06 m/s el valor máximo. La velocidad se ha incrementado en 31.4%.

Análisis de la temperatura en el interior del silenciador 1

A continuación, en la Figura 25 se presenta la temperatura del fluido en el interior del silenciador

Figura 25

Temperatura del fluido en el interior del silenciador 1



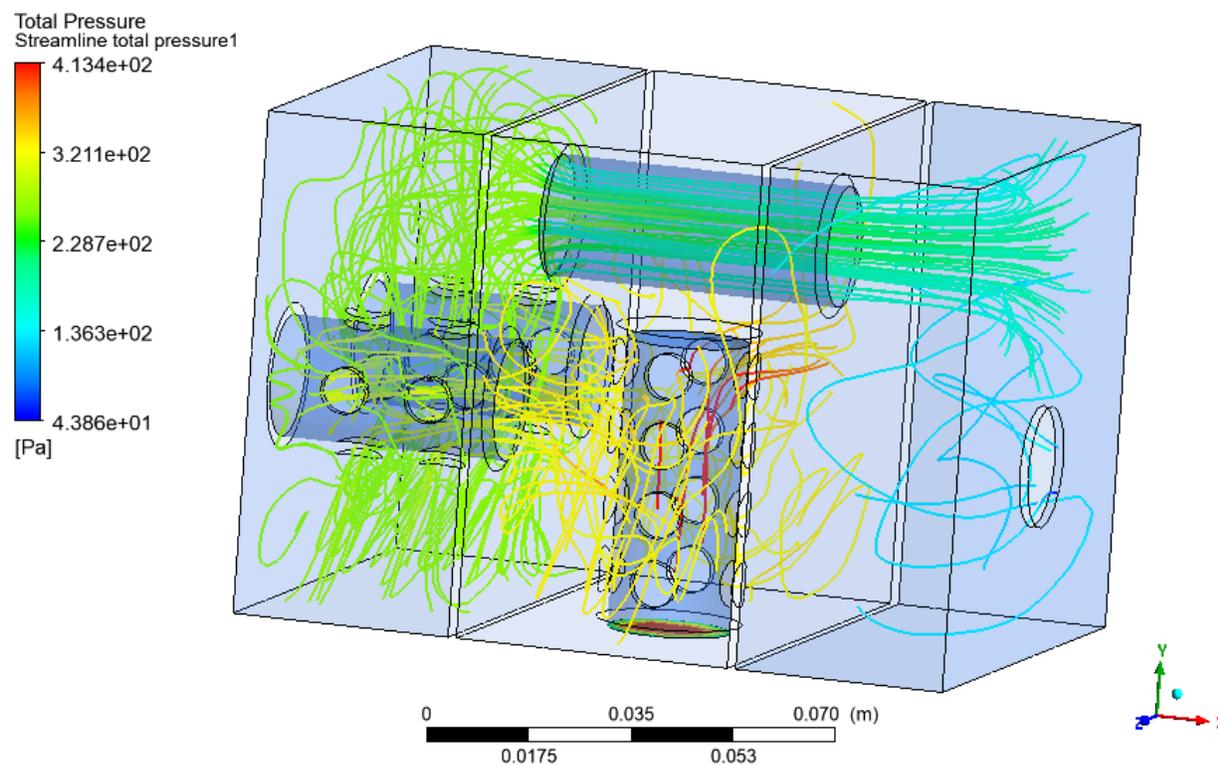
Nota: en la figura se puede apreciar que la temperatura alcanza su valor máximo en la galería 1, sin embargo, a medida que el fluido continúa con su trayectoria la temperatura disminuye, tal como se observa la temperatura mínima se encuentra en la galería 3, que se encuentra cercana al ducto de salida.

Análisis de la presión en el interior del silenciador 1

La presión que se genera producto del movimiento del fluido en el interior del silenciador se ve reflejada en la Figura 26.

Figura 26

Presión del fluido en el interior del silenciador 1



Nota. La figura muestra la presión que se genera producto del movimiento del fluido en el interior del silenciador; el valor máximo de presión se encuentra en la sección 1, esto ocurre debido a que esta zona es la encargada de redireccionar al fluido en toda la galería. Por otro parte la presión mínima se encuentra en la sección tres, este fenómeno ocurre porque en la sección tres se encuentra el ducto de escape que libera los gases hacia la atmosfera.

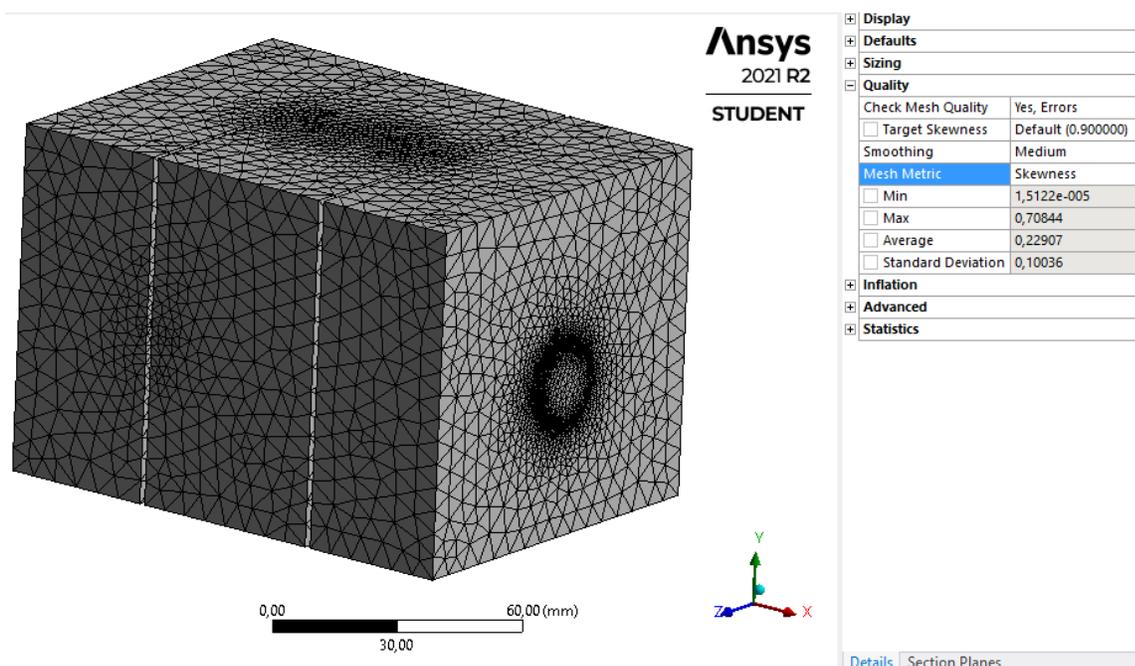
Análisis CFD del prototipo 2

Preprocesamiento

Al igual que la geometría del prototipo uno; la geometría 2 es importada al software Ansys en formato STEP; para continuar con la fase de mallado obteniendo el siguiente perfil con una calidad de malla de excelente calidad como lo indica la Figura 27

Figura 27

Malla aplicada al prototipo 2



Nota. En la figura se observa la distribución de la malla aplicada al prototipo 2. De acuerdo con la métrica Skewness se obtiene un valor promedio de 0.229 por lo tanto el mallado es considerado excelente.

Solución

Para la configuración de los parámetros que permitirán analizar el comportamiento del fluido se tienen los datos de la velocidad de los gases de escape que es de 10.7 m/s y la temperatura de los mismos que es de 310.2°C

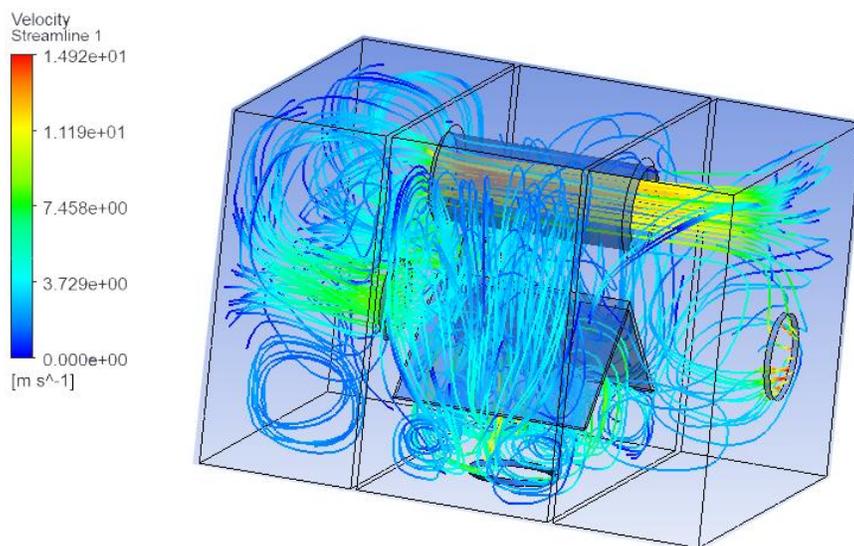
Post-procesamiento

Análisis de la velocidad en el interior del silenciador 2

Los valores de velocidad que toma el fluido en el interior del silenciador se ven representados en la Figura 28.

Figura 28

Velocidad de los gases de escape en el prototipo 2



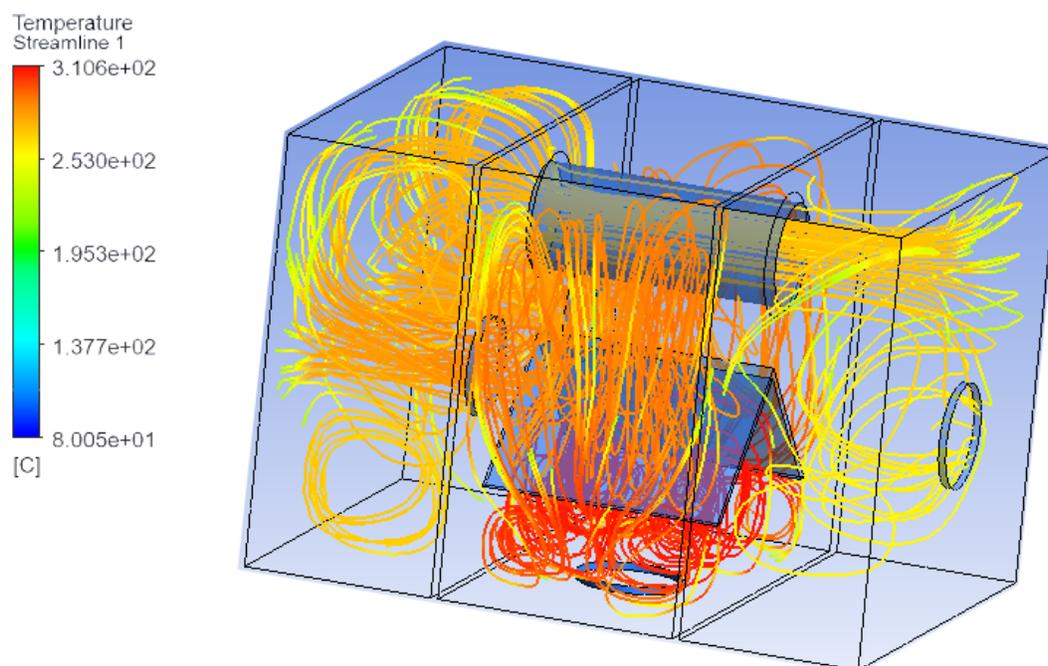
Nota. La velocidad del fluido alcanza los valores máximos en la sección triangular donde el fluido choca con las paredes generando turbulencia en la sección 1. Así como también, el fluido se acelera en los puntos donde el fluido presenta poca resistencia al movimiento; tal como es la sección del tubo interno, aquí el fluido alcanza valores de velocidad elevados de 14.9 m/s debido a que se desplaza por una sección uniforme. Tomando en consideración que la velocidad inicial es de 10.7 m/s y existen zonas con valores de 14.7 m/s esto implica que la velocidad se ha incrementado en 39.2%. Por otra parte, los puntos donde los valores de velocidad son mínimos es en las zonas cercanas a las paredes del silenciador y en las galerías de expansión.

Análisis de la temperatura en el interior del silenciador 2

La temperatura de los gases de escape en el interior del silenciador del prototipo 2 se muestran en la Figura 29.

Figura 29

Temperatura de los gases de escape en el prototipo 2



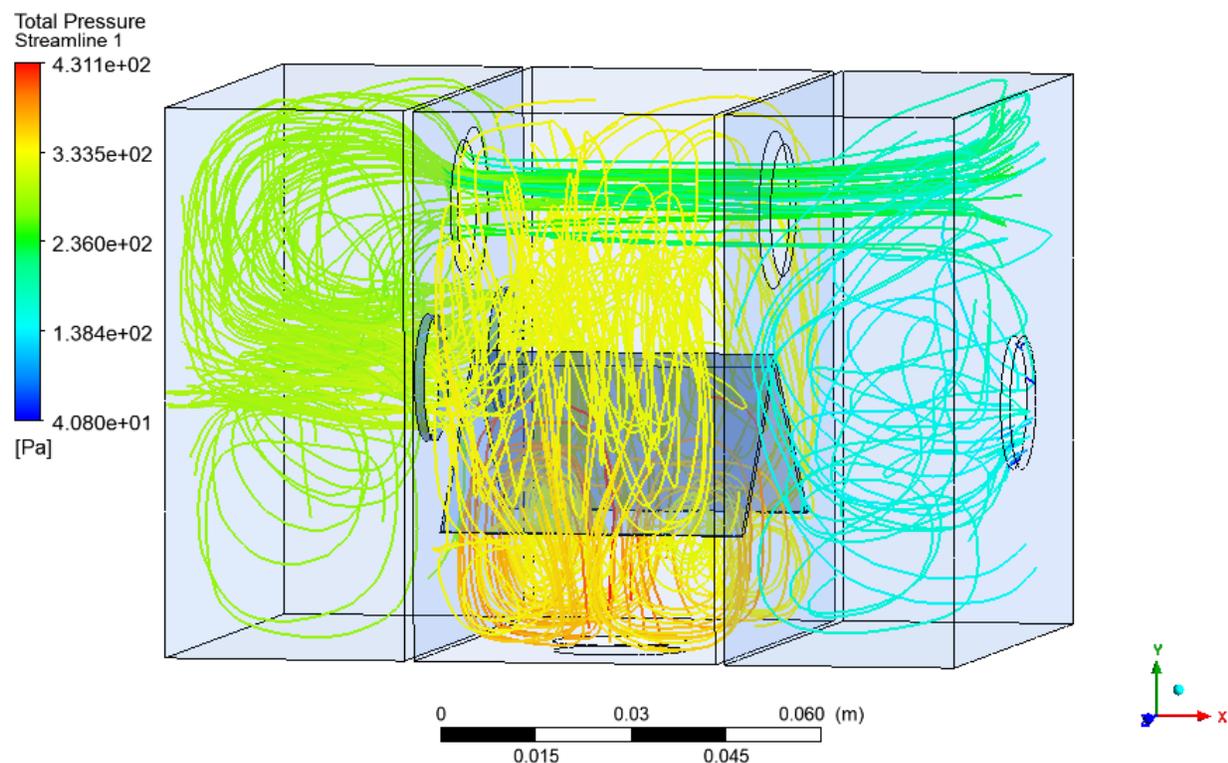
Nota. La temperatura máxima del fluido se observa en la sección triangular, siendo este el primer punto que recepta a los gases de escape. A medida que el fluido continúa con su trayectoria la temperatura disminuye, obteniendo los valores mínimos en la zona del ducto de salida, debido a que el fluido a su salida se encuentra con la temperatura ambiente.

Análisis de la presión en el interior del silenciador 2

La presión que se produce en el interior del silenciador se ve reflejada en la Figura 30

Figura 30

Presión de los gases de escape en el prototipo 2



Nota. Los puntos donde se genera la mayor presión se ubican en la sección triangular, debido a que el fluido cambia la dirección de movimiento de forma repentina; la sección 2 al ser una zona de expansión alberga los valores de presión media mientras que en la sección 3 se obtienen los valores de mínima presión debido a que el fluido está próximo a encontrarse con la presión atmosférica.

Construcción del prototipo

Para la construcción del prototipo 1 y 2 se emplearán los mismos materiales; por lo tanto, la eficiencia de cada silenciador depende únicamente de la geometría interna de cada prototipo.

Materiales empleados en la fabricación

El principal material empleado en la fabricación de los silenciadores es la lámina de acero, a continuación, en la Tabla 13 se presentan las características del material empleado

Tabla 13

Propiedades de la lámina de acero

Tipo	Lamina de acero galvanizado
Espesor	1.5 mm
Calidad	CSB - JIS 3141 SPCC SD
Temperatura de fusión	1480 – 1526 °C
Temperatura de funcionamiento	500°C

Nota. Las características plasmadas en la tabla son tomadas en base a la designación del fabricante: (DipacManta, 2022a)

El acero galvanizado se ha seleccionado debido a sus propiedades anticorrosivas y de extensa duración, las cuales se acoplan perfectamente a las condiciones de operación de los silenciadores a fabricar.

Para los conductos internos del silenciador se emplearon tubos de acero estructural cuyos datos técnicos son recopilados en la Tabla 14.

Tabla 14*Propiedades del tubo de acero estructural*

Tipo	Tubo de acero estructural
Diámetro	1 pulgada
Espesor	2 mm
Calidad	SAE J 403 1008
Temperatura de fusión	1480 – 1526 °C
Temperatura de funcionamiento	500°C

Nota. Los datos que se plasman en la tabla son obtenidos en base a las especificaciones del fabricante tomado de (DipacManta, 2022b) y (Matmatch GmbH, 2022)

El proceso de soldadura MIG se efectuó bajo las siguientes condiciones como lo indica la Tabla 15.

Tabla 15*Parámetros para suelda MIG*

Electrodo	70S-6
Diámetro electrodo	0.9 mm
Voltaje	18 - 19 V
Velocidad del alambre	3 - 3.6 m/min
Gas	CO ₂
Flujo de gas	10-12 lts/min

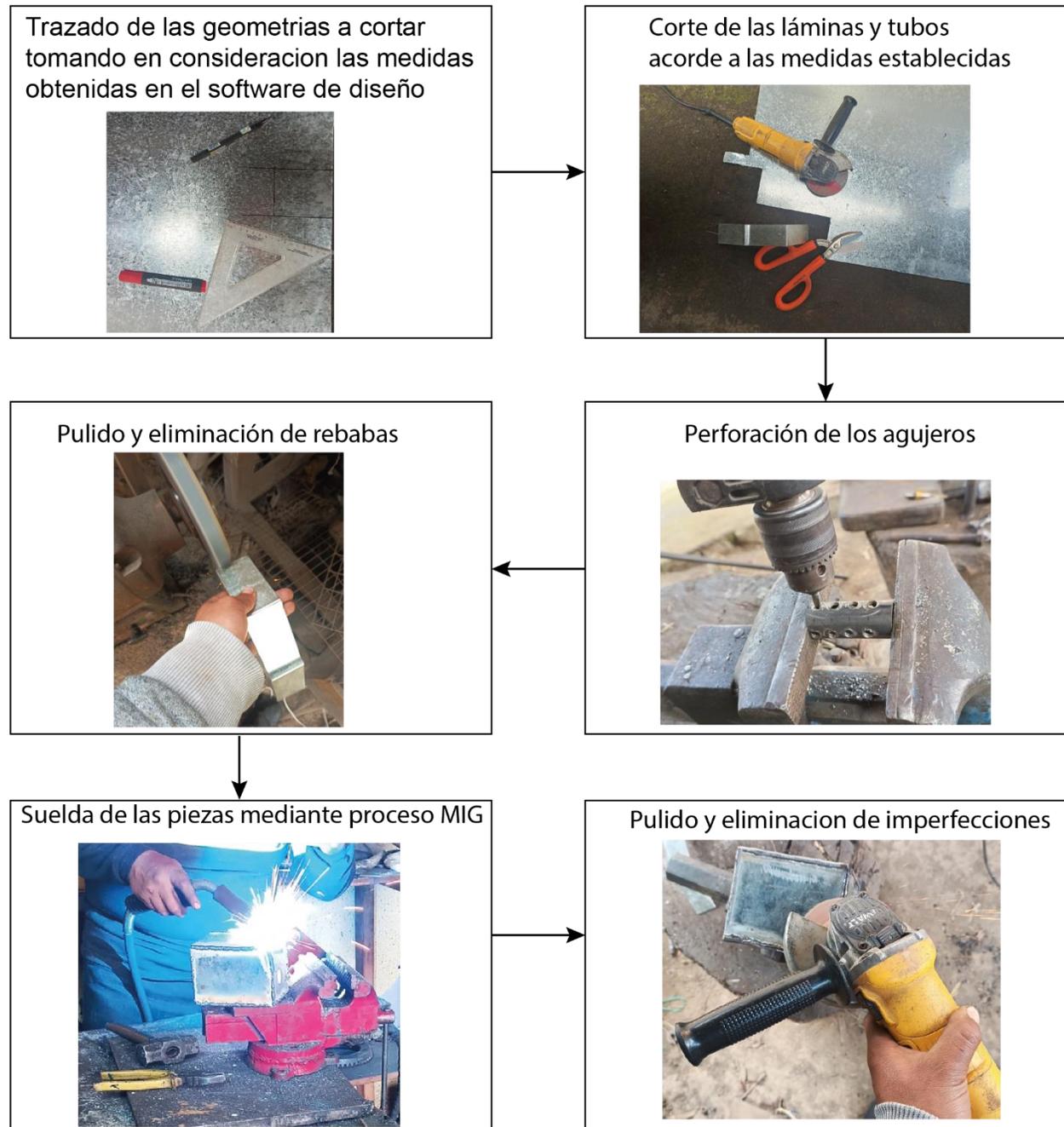
Nota. Los valores de la tabla son tomados en base a las recomendaciones del fabricante: (INDURA, 2019).

Proceso de fabricación del silenciador

El proceso de fabricación de los silenciadores se puede apreciar en la Figura 31.

Figura 31

Proceso de fabricación



Capítulo IV

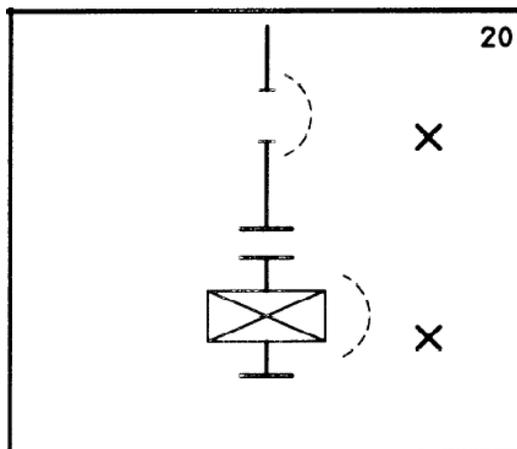
Validación y Análisis de Resultados

Medición de niveles de ruido

Para realizar la medición de los niveles de ruido se emplea la normativa INEN ISO 11820 Acústica – Mediciones de silenciadores in situ, la cual se recalca las siguientes consideraciones para efectuar la medición. En primer lugar, se tiene el esquema general donde se efectuará la medición tal como indica la Figura 32.

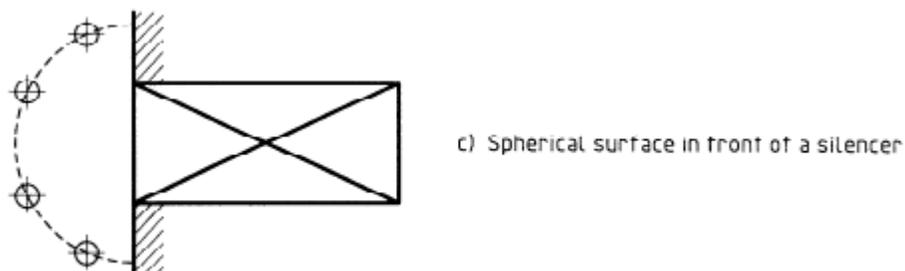
Figura 32

Esquema para realizar la medición



Nota. De acuerdo con el esquema planteado por la normativa, si el ruido proviene de un ducto hacia el silenciador y se libera hacia un espacio abierto las mediciones deben realizarse en la sección frontal del silenciador, y en el ducto sin silenciador; el instrumento de medición no debe alejarse a más de 1m de la fuente de ruido Tomado de (ISO, 1996, p. 6)

Los puntos donde se efectuarán las mediciones serán acorde a lo indicado en la normativa como indica la Figura 33

Figura 33*Puntos de medición*

Nota. Según la normativa las mediciones se realizan en cuatro puntos distribuidos en un semicírculo, Tomado de (ISO, 1996, p. 8)

En base a la normativa INEN ISO 11820 el instrumento de medición requiere de ciertas características, por lo tanto, en la Tabla 16 se muestra los datos referentes al sonómetro empleado:

Tabla 16*Características del sonómetro*

Sonómetro	Clase 1
Precisión	± 0.7 dB
Rango de medición	30 a 130 dB
Frecuencias ponderadas	A, C
Ponderación del tiempo	Fast, Slow
Registro de datos	32000 datos
Conexión USB	Si

De acuerdo con las características del ensayo, en la Figura 34 se puede observar cómo se realizó el proceso para la toma de datos:

Figura 34

Puntos para la medición de los niveles de ruido



Niveles de ruido del motor de combustión interna

El motor es una fuente de ruido, que se origina producto de la combustión, por lo tanto, los datos, se obtienen con el motor en funcionamiento sin el silenciador, de esta forma se conoce los valores propios de la fuente de ruido. Estos valores son plasmados en la Tabla 17

Tabla 17

Niveles de presión sonora del motor de combustión

Medición	Valor (dB)
1	108.2
2	107.2
3	107.3
4	108.2
Promedio	107.8

Niveles de ruido con el silenciador original

Para contrastar los niveles de ruido con las diferentes geometrías de silenciador es imprescindible conocer los valores, al emplear el sistema de escape original. Estos valores se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18

Niveles de presión sonora con el silenciador original

Medición	Valor (dB)
1	92.8
2	93.9
3	93.2
4	92.6
Promedio	93.13

Niveles de ruido con el prototipo 1

Los valores de niveles de ruido al implementar el prototipo 1 se observan en la Tabla 19.

Tabla 19

Niveles de presión sonora con el Prototipo 1

Medición	Valor (dB)
1	90.3
2	90.5
3	91.9
4	89.5
Promedio	90.55

Niveles de ruido con el prototipo 2

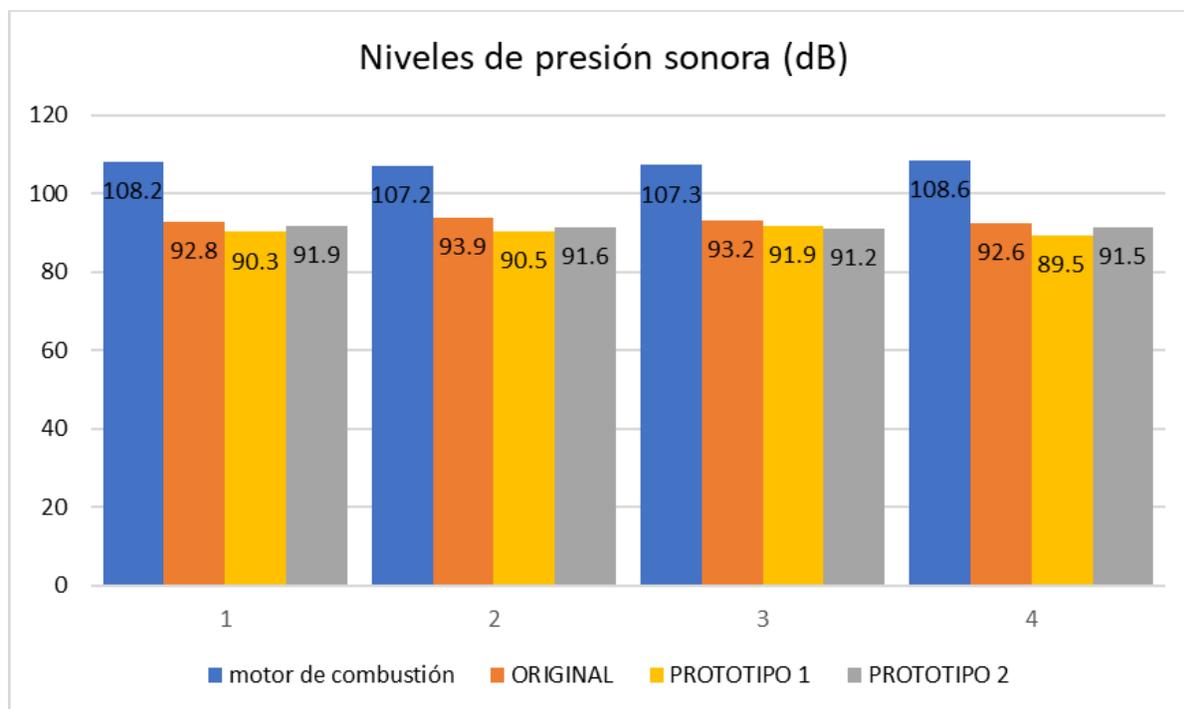
Los valores de los niveles de ruido obtenidos del prototipo 2 se detallan en la Tabla 20

Tabla 20

Niveles de presión sonora con el Prototipo 2

Medición	Valor (dB)
1	91.9
2	91.6
3	91.2
4	91.5
Promedio	91.55

A continuación, en la Figura 35 se representan los valores de los niveles de presión sonora de acuerdo a los puntos de medición.

Figura 35*Niveles de Presión sonora*

Nota. En la figura se observan los niveles de presión sonora obtenidos en los cuatro puntos de medición, además se observa los valores para cada tipo de silenciador. De acuerdo con estos datos el prototipo 1, el cual es un silenciador compuesto por tubos y galerías; es quien genera la mayor reducción de ruido en los distintos puntos de medición.

Reducción de ruido

De acuerdo con la normativa INEN ISO 11820 para evaluar los niveles de reducción de ruido se emplea la pérdida por inserción cuyo parámetro se define según la Ecuación 13

Ecuación 13

Perdidas por inserción

$$Dis = \left(L_{pI} + 10 \log \left(\frac{sl}{s_0} \right) + kI \right) - \left(L_{pII} + 10 \log \left(\frac{slI}{s_0} \right) + kII \right) \quad (13)$$

Donde:

L_{pI} y L_{pII} : son los valores promediados en dB de los puntos de medición, tanto con el silenciador instalado, así como sin el silenciador respectivamente.

S_I y S_{II} : son el área de la superficie de medición tanto con el silenciador y sin el silenciador respectivamente.

k_I y k_{II} : Son los factores de corrección sin embargo estos se cancelan.

Al aplicar la Ecuación 13 con los datos de nivel de ruido obtenidos, se calcula la pérdida de inserción estos valores se presentan en la Tabla 21 y se presentan de forma gráfica en la Figura 36.

Tabla 21

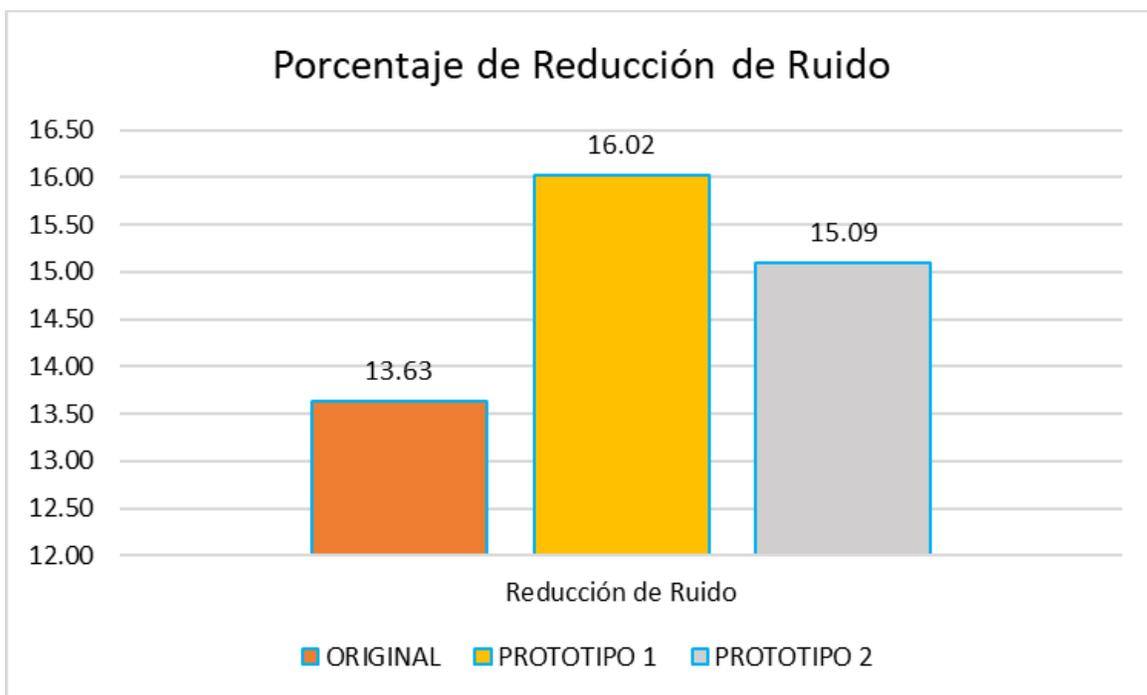
Perdidas por inserción y reducción del ruido

	Nivel de ruido dB	Perdidas por inserción dB	Reducción de ruido
Motor de combustión	107.83	-	-
Silenciador original	93.13	14.86	13.63 %
Prototipo 1	90.55	17.28	16.02 %
Prototipo 2	91.55	16.28	15.09 %

Nota. De acuerdo con la tabla el prototipo 1 conformado en su interior por un conjunto de tubos y galerías, es el silenciador que presenta el nivel de pérdidas por inserción más elevado.

Figura 36

Porcentaje de reducción de ruido



Nota. La gráfica muestra la comparación del porcentaje de reducción de ruido, en la cual el prototipo 1 reduce los niveles de ruido en un 16.02% con lo cual se valida la hipótesis del proyecto. De esta forma se consigue mejorar las prestaciones del silenciador en el monocilíndrico.

Perdidas de presión

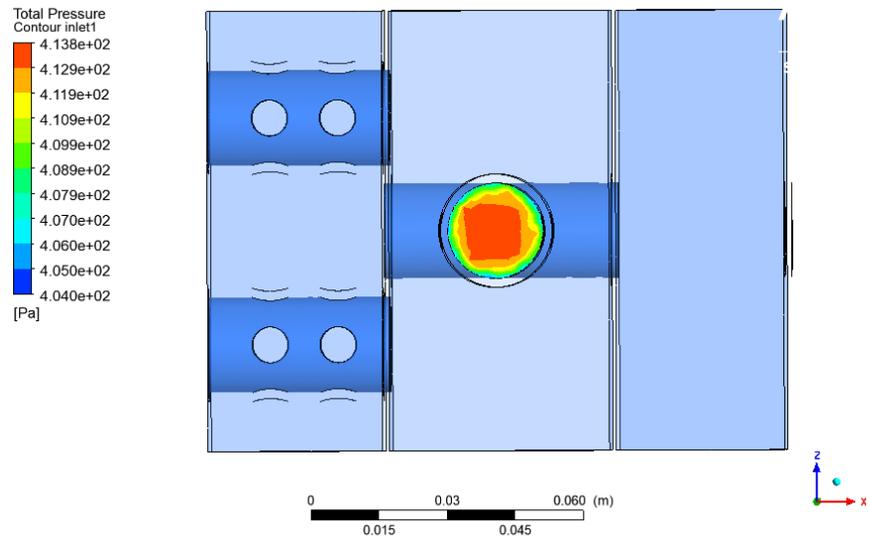
Los niveles de contrapresión que se efectúan en el interior silenciador son varían en función del silenciador. Para obtener este valor es necesario analizar el ducto de entrada y salida de cada silenciador.

Perdidas de presión en el Prototipo 1

A continuación, se indican los valores de presión en la entrada y salida del silenciador en la Figura 37 y Figura 38 respectivamente.

Figura 37

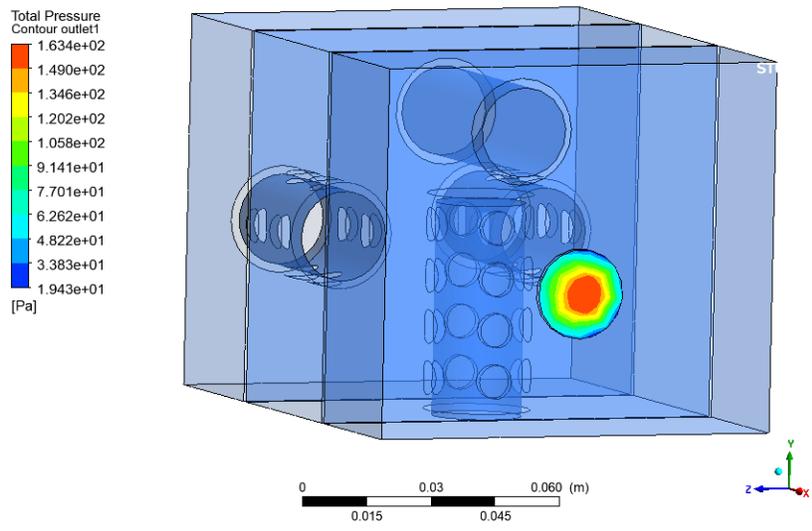
Presión en el ducto de entrada del prototipo 1



Nota. La figura indica la distribución de presiones en el ducto de entrada del silenciador 1, el valor máximo que se obtiene es de 413.8 Pa.

Figura 38

Presión en el ducto de salida del prototipo 1



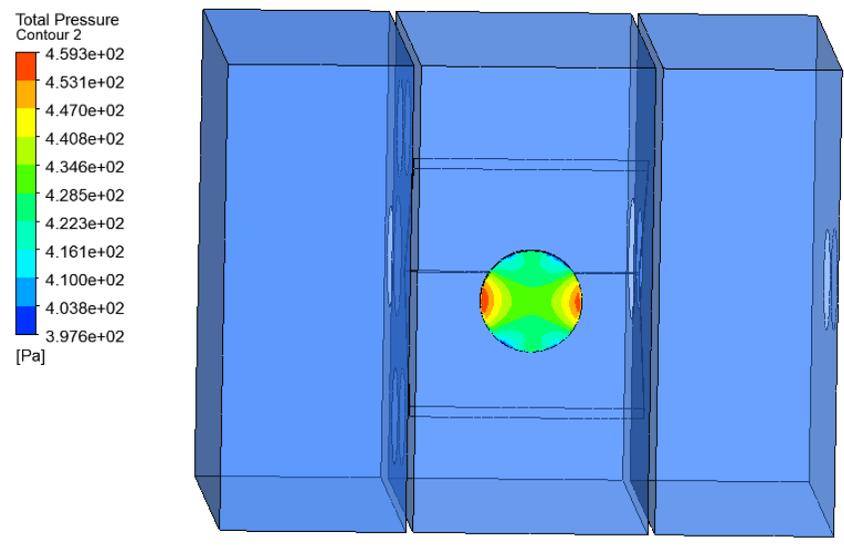
Nota. El gráfico se observa la distribución de la presión en ducto de salida del silenciador dos; el valor máximo de la presión es de 163.4 Pa.

Perdidas de presión en el prototipo 2

A continuación, se indican los valores de presión en la entrada y salida del silenciador en la Figura 39 y Figura 40 respectivamente.

Figura 39

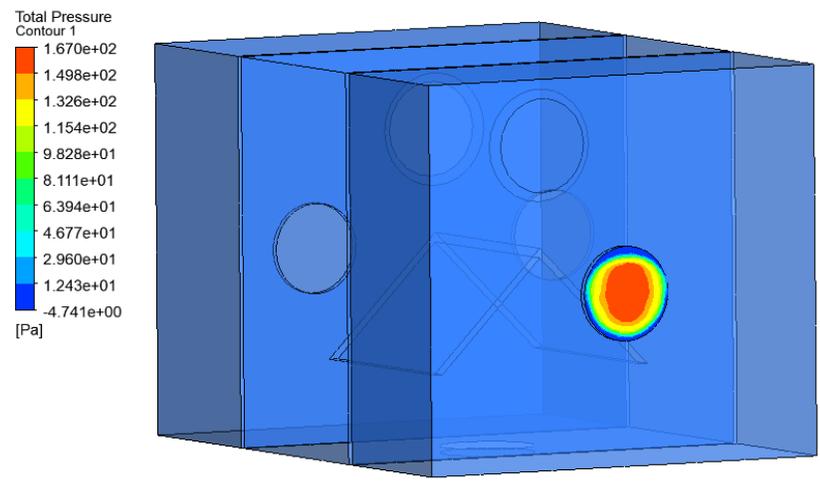
Presión en el ducto de entrada del prototipo 2



Nota. La figura indica la distribución de presiones en el ducto de entrada del silenciador 2, el valor máximo que se obtiene es de 459.3 Pa.

Figura 40

Presión en el ducto de salida del prototipo 2



Nota. En el gráfico se observa la distribución de la presión en ducto de salida del silenciador dos; el valor máximo de la presión es de 167 Pa.

En base a los valores de presión obtenidos en los ductos de entrada y salida se procede a calcular los valores de contrapresión generados, estos valores se plasman en la Tabla 22

Tabla 22

Perdidas de presión en los silenciadores

	Presión de entrada	Presión de salida	Perdidas de presión Pa (inHg)
Prototipo 1	413.8	163.4	250.4 (0.07)
Prototipo 2	459.3	167	292.3 (0.08)

Tomando en consideración la relación que indica el autor (BARRETO, 2014, p. 6) “por cada pulgada de mercurio inHg de contrapresión se pierde 1% de potencia del motor”. Bajo esta premisa los valores de contrapresión de 0.07inHg para el prototipo 1 y 0.08inHg para el prototipo 2, generan efectos despreciables en el desempeño del motor. Con esto se garantiza que los silenciadores cumplan con sus funciones de reducir los niveles de ruido sin intervenir con el correcto desempeño del motor.

Capítulo V

Marco Administrativo

Recursos Humanos

El personal a cargo del proyecto se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23

Recursos humanos

Número	Nombre	Detalle
1	Pastrano Andrango, José Esteban	Investigador
2	Ing. Manjarres Arias, Félix Javier M. Sc.	Director de Tesis

Recursos Tecnológicos

Los recursos tecnológicos empleados en el desarrollo del proyecto se indican en la

Tabla 24

Recursos tecnológicos

Número	Recurso	Cantidad
1	Software CAD, CAE	1
2	Computador Portátil	1
3	Sonómetro	1
4	Anemómetro	1
5	Termómetro	1
3	Impresora	1

Presupuesto

Recursos Materiales

El costo de los recursos materiales y tecnológicos empleados en el proyecto se observan la Tabla 25.

Tabla 25

Costo de los Recursos materiales y tecnológicos

Recursos materiales y tecnológicos			
Detalle	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Anemómetro	1	65	65
Termómetro tipo sonda	1	75	75
Motor mono cilíndrico	1	189	189
Material de silenciadores	1	101.5	101.5
Normativa	1	100	100
Medidor de presión	1	50	50
TOTAL			580.5

Recursos de apoyo

Durante el desarrollo del proyecto surgieron varios gastos extras los mismos que se detallan en la Tabla 26

Tabla 26

Recursos de apoyo

Número	Recurso	Valor (\$)
1	Transporte	100
2	Impresiones	15
3	Imprevistos	100
	Total	215

El presupuesto total para el desarrollo del proyecto se presenta en la Tabla 27

Tabla 27

Presupuesto total

Número	Recurso	Valor (\$)
1	Recursos materiales y tecnológicos	580.5
2	Recursos de apoyo	215
	Total	785.5

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Mediante la ingeniería asistida computacional, se generó dos geometrías de silenciadores las cuales reducen los niveles de ruido en 15.09% y 16.02% frente a un 13.63% obtenido con el silenciador original; con lo cual se ha mejorado el desempeño de los silenciadores aplicados a motores monocilíndricos.
- Para efecto de la investigación se analizaron dos tipos de geometrías, el primer prototipo está compuesto por una configuración de ductos y galerías, basado en la diseño común de los silenciadores empleados en la industria automotriz, mientras que el segundo prototipo es una configuración poco convencional, que contiene en su interior un elemento de forma triangular, cuyo principal objetivo es reflejar las ondas sonoras para que se cancelen, el diseño está basado en las geometrías del fabricante de silenciadores Flow Master.
- El proceso de simulación se llevó a cabo mediante el software Ansys, por lo tanto, para realizar un proceso confiable, las condiciones de frontera se obtuvieron a través de la toma de datos en el motor de combustión monocilíndrico, los mismos procesos que fueron realizados bajo estándares y procesos estadísticos que respaldan la veracidad de los datos.
- A partir del análisis CFD se determinaron los valores de temperatura, alcanzando un valor máximo de 310 °C; esta temperatura se encuentra en la sección 1 de los silenciadores debido, a que es la primera zona que mantiene contacto con los gases de escape; no obstante a medida que el fluido atraviesa el silenciador este pierde energía en forma de calor con lo cual se reduce su valor, siendo los valores mínimos en la sección 3 de cada silenciador, debido a que es la zona más cercana al ducto de escape.

- El fluido en el interior del silenciador alcanza velocidades superiores al valor de entrada, este fenómeno ocurre debido a los cambios de sección, siendo las secciones tubulares las zonas con mayor velocidad, para el prototipo 1 se obtuvo un incremento del 31.4% y para el prototipo 2 la velocidad se incrementó en 39.2%.
- Los prototipos de silenciador permitieron la reducción del ruido generado por la combustión siendo este valor igual 107.8 dB, no obstante, con la implementación de los silenciadores, los niveles de ruido disminuyeron; obteniendo un valor 90.55 dB para el prototipo 1 y 91.55dB para el prototipo 2
- El proyecto se centra en el estudio de silenciadores reactivos, lo que implica que la reducción de ruido se produce debido a la configuración de la geometría interna del silenciador. Por lo tanto, la elaboración de estas geometrías requiere procesos de fabricación convencionales como: trazado, corte, suelda y pulido.
- En las dos configuraciones de silenciadores se distinguen tres zonas, de las cuales la zona 1 mantiene el primer contacto con los gases de escape, en este punto se encuentran los valores de presión velocidad y temperatura más elevados; la zona 2 o de expansión es donde se encuentran los valores intermedios de temperatura velocidad y presión, y finalmente la zona 3 en la cual se encuentra el ducto de escape es donde la presión temperatura y velocidad disminuyen.
- A partir de los niveles de ruido obtenidos para cada silenciador se concluye que el prototipo 1, mediante su configuración de ductos y galerías es el silenciador que reduce en mayor cantidad los niveles de ruido con un porcentaje de 16.02%; mientras que el prototipo 2 logra un valor de 15.09%; siendo estos valores superiores al 13.7% que alcanza el silenciador original.

- Al obtener valores de reducción de ruido de 16.02% y 15.09%, tanto con el silenciador 1 y 2 se valida la hipótesis del proyecto, con lo cual los dos prototipos superan la meta de reducción de ruido del 15%.
- Las pérdidas de presión generadas por las complejas geometrías internas de los silenciadores no superan, el límite 40 kPa propuesto para motores de menos de 50 kW, obteniendo como resultado valores despreciables de 250.4Pa y 292.3Pa, para el prototipo 1 y 2 respectivamente, esto implica que la geometría de los silenciadores no influye en el desempeño del motor.

Recomendaciones

- Investigar la eficiencia de los silenciadores con material absorbente con la finalidad de obtener mejores resultados en la reducción de ruido.
- Aplicar el proceso de optimización a otro tipo de silenciadores para contrastar los valores con el presente estudio.
- Realizar un análisis de mercado que permita conocer la factibilidad de comercializar este tipo de silenciadores en el mercado.
- Implementar laboratorios que permitan experimentar con el diseño de autopartes.

Bibliografía

- Amaral, L. (2016, May 27). *Preparación de modelos para generación de mallas*. ESSS. <https://www.esss.co/es/blog/preparacion-de-modelos-para-generacion-de-mallas/>
- Aniekan, I., Orhorhoro, K., & Abdulsamad, G. (2017). Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software. *INTERNATIONAL JOURNAL of ENGINEERING TECHNOLOGIES-IJET*, 3, 50–60. <https://doi.org/10.19072/ijet.282847>
- ANSYS Inc. (2015a). *ANSYS Fluent User's Guide* (15th ed.). ANSYS Inc. [http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS Fluent Users Guide.pdf](http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf)
- ANSYS Inc. (2015b). *ANSYS Fluent User's Guide* (15th ed.). ANSYS Inc.
- ANSYS Inc. (2015c). *Mesh Quality & Advanced Topics* (15th ed.). ANSYS Inc.
- ANSYS Inc. (2015d). *Mesh Quality & Advanced Topics* (15th ed.). ANSYS Inc. https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro_16.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf
- BARRETO, D. F. (2014). *MEDICIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN TUBOS DE ESCAPE DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA EVALUACIÓN DE CALIDAD Y DESEMPEÑO* [UNIVERSIDAD DE LOS ANDES]. <http://hdl.handle.net/1992/16092>
- BAZURTO PALMA, D., & LÓPEZ LÓPEZ, S. (2003). *Estudio y diseño para la fabricación de silenciadores en vehículos diesel y gasolina*. [ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/3985>
- Cáceres, S. H., & Chambilla Flores, I. G. (2021). ESTUDIO DEL RUIDO GENERADO POR LA MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL URBANA. *INVESTIGACIÓN & DESARROLLO*, 21(1), 87–97. <https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-7i>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2011). *TERMODINÁMICA* (7th ed.). Mc Graw Hill.
- COMFORZA. (2021, September 14). *MOTOR ESTACIONARIO. Qué es, funcionamiento y partes*. https://comforza.com.pa/motores-estacionarios/#Para_que_sirve_un_motor_estacionario
- DipacManta. (2022a). *PLANCHAS GALVANIZADAS*. DipacManta. <https://dipacmanta.com>

- DipacManta. (2022b). *TUBO ESTRUCTURAL REDONDO*. dipacmanta. <https://dipacmanta.com>
- ESSS. (2020, September 14). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?*
<https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Galindo, E. (2011). *Estadística Métodos y Aplicaciones* (1st ed.). Prociencia.
- García Luque, A. (2014). *Estudio comparativo del desempeño de los métodos FEM y MMT para el cálculo de la atenuación sonora de silenciadores pasivos* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51758?show=full>
- Giancoli, D. (2008). *FÍSICA para CIENCIAS E INGENIERÍA* (4° ed.). PEARSON.
- Holly Performance. (2022). *Exhaust System*.
https://www.holley.com/products/exhaust/mufflers/street_chambered_mufflers/super_10_series/
- INDURA. (2019). *Alambre MIG/MAG de INDURA*. INDURA. <https://www.indura.com.ec/web/ec>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene. (2004). *NTP 668: Medición del caudal en sistemas de extracción localizada*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_668.pdf/96f8cb5d-5f02-436f-a907-923613767a3a
- ISO. (1996). *Acoustics - Measurements on silencers in situ* (p. 24). International Organization for Standardization.
- Llumigusin, N. F. (2015). *DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE SALIDA DE GASES DE ESCAPE DE UN VEHÍCULO CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS*. [UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL].
http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/14024/1/63031_1.pdf
- Matmatch GmbH. (2022, July 20). *SAE J403 Grade 1008*.
<https://matmatch.com/es/materials/minfc37594-sae-j403-grade-1008>

- Méndez López, M. Á., Avella Suarez, M. A., Giraldo Ávila, J. F., & Ochoa Avendaño, J. F. (2017). Cálculo de la pérdida de transmisión acústica y de contrapresión en silenciadores, mediante el método de los elementos finitos. *Fundación Universidad de América*, 10(2), 91–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.29097/2011-639X.84>
- Mi Mecanica Popular. (2010, September 9). *Silenciador para motores estacionarios*. <https://www.mimecanicapopular.com/vermnota.php?n=798>
- Mori Gonzalez, G. (2016). *Análisis estructural y atenuante de un silenciador* [Universidad de Sevilla]. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwib6v6YwMD1AhWpSzABHct6CcMQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fbiblus.us.es%2Fbibing%2Fproyectos%2Fabreproy%2F90700%2Fdescargar_fichero%2FAn%25C3%25A1lisis%2Bestructural%2By%2Batenuante%2B
- Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica Teoría y Aplicaciones* (2° ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02544-0>
- MOTORGIGA. (2022, July 15). *SILENCIADOR - Definición - Significado*. <https://diccionario.motorgiga.com/>
- Munjal, M. L. (2014). *ACOUSTICS OF DUCTS AND MUFFLERS* (segunda). WILEY.
- Munuera, P. J., & Denia, F. (2019). *Desarrollo e implementación de una metodología de caracterización del comportamiento acústico de silenciadores reactivos y disipativos mediante Ansys Workbench* [UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA]. <http://hdl.handle.net/10251/122300>
- OMS. (1999). *EL RUIDO Riesgo para la salud de los trabajadores y molestia para el público*. Organización Mundial de la Salud.
- Rovira de Antonio, A., & Muñoz Domínguez, M. (2015). *Motores de Combustión Interna* (1° ed.). UNED.
- Salinas Villar, A. (2007). *Electromecánica de vehículos. Motores* (1° ed.). Paraninfo.
- Serway, R. A., & Jewett, J. J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (7°). CENGAGE LEARNING.

TOYOCOSTANOTICIA. (2014, May 30). *Sistema de escape del vehículo*.

<http://www.toyocosta.com/blog/sistema-de-escape-del-vehiculo/>

UMESH, K., PRAVIN, V., & RAJAGOPAL, K. (2013). CFD ANALYSIS OF EXHAUST MANIFOLD OF MULTI-CYLINDER SI ENGINE TO DETERMINE OPTIMAL GEOMETRY FOR REDUCING EMISSIONS. *International Journal of Automobile Engineering*, 3(4), 45–56.

YOUNG, H. D., & FREEDMAN, R. A. (2009). *Física universitaria Volumen 1* (12^o). PEARSON.

Anexos